

**РОЗПОДІЛ ПАРАМЕТРІВ
ЗОНДУВАЛЬНОГО ПУЧКА НА
РОБОЧІЙ ПОВЕРХНІ
КОМПАКТНОГО
ПРИЗМАТИЧНОГО СЕНСОРА
ДИФУЗНОГО ВІДБИВАННЯ
СВІТЛА ДЛЯ АНАЛІЗУ
ХАРАКТЕРИСТИК АЕРОЗОЛЬНИХ
ВІДКЛАДЕНЬ**

I.B. Ivasiev

Фізико-механічний інститут
НАН України
м. Львів, вул. Наукова, 5
E-mail:greg@ipm.lviv.ua

Запропоновано компактний призматичний сенсор дифузного відбивання світла з широким зондувальним пучком для експрес-аналізу характеристик аерозольних відкладень. Описано оптичну конфігурацію сенсора, включаючи конфігурацію зондувального пучка. Здійснено моделювання розподілу локальних параметрів зондувального пучка на робочій поверхні сенсора, необхідне для коректної інтерпретації сигналу сенсора.

Вступ. Одним з важливих компонентів техногенних забруднень навколошнього середовища є аерозольні викиди (пил, дим, випари і тумани). У загальному обсязі антропогенних викидів лише на пил може припадати понад 10% [1]. Завислі в повітрі аерозольні частинки вражают органі дихання людей і тварин [2], а за достатньо великих концентрацій можуть впливати на тепловий баланс у нижніх шарах атмосфери. Аерозольні частинки, що осідають на поверхні, можуть посилювати ерозію ландшафтів та будівель, вражати рослинний покрив [3] та тварин [4]. Тому контроль характеристик аерозольних викидів є важливою задачею.

Найважливішими характеристиками аерозольних викидів є їх хімічний склад, концентрація та дисперсний склад. Остання характеристика особливо важлива під час дослідження механізмів впливу аерозольних частинок на людей та довкілля, а також для оцінки поширення цих викидів від їх джерел [5]. Визначення цієї характеристики здійснюється, здебільшого, шляхом відбору проб повітря з аерозольними частинками з подальшим лабораторним аналізом, або

ж експрес-аналізом за допомогою каскадних чи інерційних імпакторів, електро-індукційних чи оптичних лічильників частинок [6]. Однак, у задачах визначення зон поширення аерозольних викидів відбір проб необхідно здійснювати протягом достатньо тривалого часу (від однієї доби і більше) одночасно в декількох точках контролю. У цьому випадку, використання переносних пробовідбірників, а тим більше – аналізаторів дисперсного складу, є надто дорогим. Тому в таких задачах доцільніше визначати параметри аерозольних відкладень, що назираються на спеціально встановлених скляних пластинках [4]. Подальший аналіз дисперсного складу отриманих відкладень здійснюється, як правило, за допомогою оптичних мікроскопів з цифровими камерами та спеціалізованих комп’ютерних програм. Такий метод забезпечує достатньо високу точність аналізу, але й має ряд суттєвих недоліків. Головними з них є великий проміжок часу між відбором проби та проведеннем аналізу, складність консервації та транспортування відібраних проб, велика трудомісткість та тривалий час самого аналізу. Тому актуальною задачею є створення переносного експрес-аналізатора дисперсного складу аерозольних відкладень.

Одним із ефективних методів експрес-аналізу дисперсного складу аерозольних відкладень є метод вимірювання характеристик дифузно-відбитого світла. Зокрема, цей метод реалізовано у скатерометрах і профілометрах фірм Schmitt Industries Inc., Accent Optical Technologies, Chapman, Keyence, а також в оптичному сенсорі пиловідкладення (Optical Deposition Sensor) спускового модуля автоматичної міжпланетної космічної станції Rosetta [7-9]. В перелічених сенсорах досліджувана поверхня зондується вузьким сфокусованим лазерним пучком типу “stylus” (рис.1).



Рис. 1. Зондування поверхні за допомогою вузького сфокусованого пучка світла

У випадку нерівномірного розподілу частинок по поверхні така оптична схема

потребує застосування сканувальних пристрійв, що суттєво ускладнює прилади, збільшує їх енергоспоживання та вартість.

У ряді попередніх праць, зокрема [10], 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, а отже, не потребує сканування. Однак він не розрахований для аналізу аерозольних відкладень на пластинках в силу криволінійної геометрії робочої поверхні. Тому автором запропоновано новий сенсор із плоскою робочою поверхнею, придатною як для безпосереднього аналізу різноманітних дисперсних середовищ і матеріалів, так і для аналізу аерозольних відкладень на пластинках. Разом з тим, конфігурація зондувального пучка світла задавалась таким чином, щоб забезпечити достатньо велику площину взаємодії з поверхнею досліджуваного середовища.

В даній праці описано оптичну конфігурацію запропонованого сенсора та змодельовано розподіл параметрів зондувального пучка на його робочій поверхні.

Оптична конфігурація сенсора. В основу запропонованого сенсора покладено принцип вимірювання кутового розподілу інтенсивності світла, дифузно відбитого поверхнею досліджуваного дисперсного середовища. Для зменшення впливу нерівностей вільної поверхні досліджуваного середовища [11] зондування ведеться крізь прозору підкладку, зовнішня (від зондувального променя) поверхня якої є робочою поверхнею сенсора, що межує з досліджуваним середовищем [9-11]. Підкладка виконана у формі перевернутої призми, основа якої служить робочою поверхнею, а скіні грані слугують для вводу зондувального пучка світла та для вимірювання кутової характеристики дифузного відбивання (рис.2). Така оптична схема забезпечує достатньо надійну роботу сенсора у польових та промислових умовах, окрім підкладки, крім основної функції,

служить їще й основою для жорсткого кріплення блоку формування зондувального пучка та блоку світлоочутливих елементів (фотолінійки).

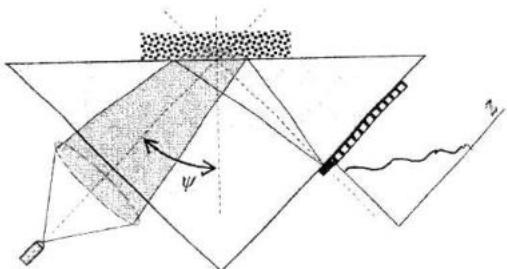


Рис. 2. Оптична конфігурація призматичного сенсора дифузного відбивання світла

Вхідний пучок сформовано таким чином, що він фокусується (після дзеркального відбивання від робочої поверхні) на вихідній грани призми, де він потрапляє у пастку для світла для уникнення небажаних внутрішніх відбивань всередині призми (див. рис. 2).

Світло, дифузно відбите дисперсним середовищем на робочій поверхні сенсора, реєструється фотолінійкою на вихідній скінній грани призми (див. рис. 2). Таким чином, за розподілом інтенсивності світла на елементах фотолінійки, визначається кутова характеристика дифузного відбивання, за якою розраховується дисперсний склад досліджуваного середовища.

Моделювання розподілу параметрів зондувального пучка на робочій поверхні сенсора. Розглянемо детальніше конфігурацію зондувального пучка у призматичній підкладці сенсора (рис. 3).

Його сформовано таким чином, щоб у матеріалі, з якого виготовлена призма, він фокусувався у точці F' (якби не було дзеркального відбивання від робочої поверхні), для якої

$$|OF'| = |OO'| + |O'F'| = 2|OO'| = f', \quad (1)$$

де точка O – центр перерізу зондувального пучка на вихідній грани призми, точка O' – перетин осі зондувального пучка з робочою поверхнею призми, F' – точка фактичного фокусування пучка на вихідній грani.

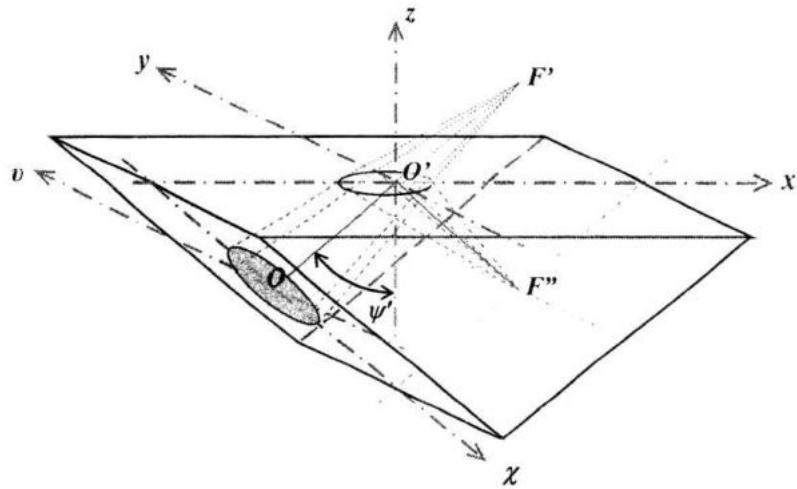


Рис. 3. Конфігурація зондувального пучка у призматичній підкладці сенсора

Досить очевидно, що для круглого по-перечного перерізу зондувального пучка освітлена ділянка на робочій поверхні буде мати форму еліпса, мала вісь якого буде рівна половині діаметра перерізу зондувального пучка на вхідній грани. Отже, заданням відповідної ширини зондувального пучка на вході в призму забезпечується

$$I_r(q) = \frac{1}{s_c} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_{y_{\min}(x)}^{y_m(x)} \sigma_s[\theta_{sr}(x, y, q), Q(x, y)] K_s(x, y, q) dx dy, \quad (2)$$

$$K_s(x, y, q) = i_s(x, y) f_s(x, y, q), \quad (3)$$

де q – лінійна координата світлочутливого елемента на фотолінійці, s_c – площа чутливого елемента, $\sigma_s[\theta_{sr}, Q]$ – диференціальний 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 дифузного відбивання відносно падаючого променя, $Q(x, y)$ – конфігураційний параметр досліджуваного середовища (аерозольного осаду) для елементарної ділянки, $K_s(x, y, q)$ – незалежна від параметрів досліджуваного середовища апаратна функція сенсора, в яку входять:

– “апаратна” функція для дифузно відбитих променів $f_s(x, y, q)$, що враховує різну довжину ходу променів у призмі в залежності від вибраної пари точок на активній ділянці робочої поверхні сенсора та на фотолінійці, різні кути падіння на поверхню вихідної скісної грани та на світлочутливі елементи фото лінійки

достатня площа освітленої ділянки для презентативного аналізу дисперсного складу аерозольних відкладень.

У загальному випадку сигнал сенсора (розподіл інтенсивності дифузно відбитого світла на фотолінійці) $I_r(q)$ можна записати за допомогою наступного функціонала:

$$[10];$$

- розподіл інтенсивності світла на активній ділянці робочої поверхні сенсора

$$i_r(x, y) = I_0 \cdot i_0[\chi(x, y)] \cdot f_r(x, y), \quad (4)$$

де I_0 – інтенсивність джерела світла, $i_0[\chi(x, y)]$ – діаграма направленості джерела світла, $\chi(x, y)$ – кут у діаграмі направленості, що визначеним чином зв’язаний з координатами (x, y) довільної точки на активній ділянці робочої поверхні сенсора через задану геометрію зондувального пучка, $f_r(x, y)$ – “апаратна” функція для зондувальних променів, що враховує ослаблення променів у матеріалі призми, залежність коефіцієнтів відбивання світла від кута падіння променів на границі розділу середовищ і т.п.

Із виразів (2), (3) випливає, що сумарний сигнал сенсора суттєво залежить як від розподілу фізичних і, зокрема, оптичних параметрів досліджуваного середовища на робочій поверхні, так і від розподілу

окремих параметрів самої оптичної схеми. Зокрема, одним із таких очевидних параметрів є розподіл інтенсивності світла на активній ділянці робочої поверхні сенсора (4). Формуючим фактором при цьому є діаграма направленості джерела світла $i_0(\gamma)$, що задає початковий розподіл інтенсивності, який зазнає подальших трансформацій внаслідок формування пучка світла та проходження його через оптичну систему сенсора (див. рис. 2).

Для моделювання розподілу інтенсивності світла на активній ділянці робочої поверхні задано наступні параметри оптичної схеми:

- відстань, що проходить центральний промінь пучка від входної грані призми до точки фокусування на вихідній грані $f'=50$ мм;

- кут падіння пучка (центрального променя) на робочу поверхню $\psi'=30^\circ$;

- діаметр апертурної діафрагми формувальної лінзи $D=8$ мм;

- в якості точкового джерела світла використовується інфрачервоний світлодіод SFH4301 фірми Infineon Technologies AG;

- показник заломлення матеріалу призми (оргекло) $n=1,64$.

Вказані модельні параметри відповідають реальним параметрам макета сенсора, виготовленого у Фізикомеханічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України. В ході виготовлення макета також було враховано, що під час входження сфокусованого пучка світла у призму точка фокусування променів віддається від лінзи. Для врахування цього ефекту параметри схеми фокусування підбиралися таким чином, щоб забезпечити задану віддалю фокусування променів f' . Для однолінзової схеми це досягалось вибором відповідної відстані між точковим джерелом світла та лінзою f_{LS} , а також мінімальним зазором між лінзою і входною гранню призми.

Також було прийнято наступні допущення:

- ослаблення променів внаслідок довшого шляху їх проходження від точкового джерела світла до країв лінзи порівняно із центральними променями компенсується меншою товщиною лінзи по краях;

- для мінімального зазору між лін-

зою і входною гранню призми можна застосувати зменшенням діаметра попечерного перерізу зондувального пучка на входній грані призми;

- можна застосувати незначним ослабленням променів зондувального пучка в матеріалі призми;

- для заданих діаметра апертурної діафрагми $D=8$ мм та кута падіння центрального променя на робочу поверхню сенсора $\psi'=30^\circ$ можна не враховувати залежності коефіцієнта дзеркального відбирання променів робочою поверхнею сенсора від кута падіння.

Таким чином, для моделювання розподілу інтенсивності світла на активній ділянці робочої поверхні сенсора можна скористатися спрощеною схемою формування пучка, зображену на рис. 4.

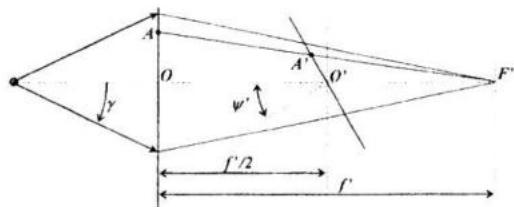


Рис. 4. Спрощена схема формування зондувального пучка

Згідно з наведеною схемою, процес формування розподілу інтенсивності світла складається з двох етапів:

- 1) формування розподілу інтенсивності світла на входній грані призми за рахунок діаграми направленості джерела світла;

- 2) відображення отриманого розподілу інтенсивності світла з входної грані призми на її робочу поверхню.

Дійсно, оскільки усі промені, що виходять з входної грані призми фокусуються в точці F' , то вони взаємно-однозначно відображають будь яку точку A площини xOu (див. рис. 3, 4) на освітленій ділянці входної грані у відповідну точку A' площини $xO'u$ (див. рис. 3, 4) на робочій поверхні сенсора, формуючи на ній освітлену область.

Розглянемо детальніше вказане відображення та виведемо співвідношення, що зв'язують координати точки A' на робочій поверхні сенсора ($x_{A'}, y_{A'}$) з координатами відповідної точки A на входній грані призми (x_A, y_A).

Для цього необхідно записати вирази, що виражають координати довільної точки A' на робочій поверхні, записані у тривимірній системі координат $(O\chi\nu\zeta)$, де вісь $(O\zeta)$ спрямована вздовж променя $[OF')$, через її ж координати у системі $(O'xy)$ (див. рис. 3):

$$\chi_{A'} = x_{A'} \cdot \cos \psi', \quad (5)$$

$$v_{A'} = y_{A'}, \quad (6)$$

$$\zeta_{A'} = 0,5f' + x_{A'} \cdot \sin \psi'. \quad (7)$$

Записуючи тепер у системі $(O\chi\nu\zeta)$ тривимірне рівняння для проектируючого променя $[AF')$ як рівняння прямої, що проходить через точки $A'(\chi_{A'}, v_{A'}, \zeta_{A'})$ та $F'(0,0,f')$, знаходимо координати точки $A(\chi_A, v_A)$ на перетині отриманої прямої з площину $\chi\nu\omega$ за умови $\zeta=0$, виражені через координати $(\chi_{A'}, v_{A'}, \zeta_{A'})$. Підстав-

$$x_A = 0,5f' \left(\sin \psi' + \cos \psi' \frac{\chi_{A'} \cos \psi' - f' \sin \psi'}{\chi_{A'} \sin \psi' + f' \cos \psi'} \right), \quad (10)$$

$$v_A = 0,5f' \frac{v_{A'} \cos \psi'}{\chi_{A'} \sin \psi' + f' \cos \psi'}. \quad (11)$$

Якщо тепер маємо рівняння для границі круглої освітленої ділянки на вхідній грани призми:

$$\chi_E^2 + v_E^2 = (D/2)^2, \quad (12)$$

або

$$v_E = \pm \sqrt{(D/2)^2 - \chi_E^2}, \quad (13)$$

то підставляючи (13) в (11), отримаємо вираз

$$y_E = \pm 0,5f' \frac{\cos \psi' \cdot \sqrt{(D/2)^2 - \chi_E^2}}{\chi_E \sin \psi' + f' \cos \psi'}. \quad (14)$$

Підставляючи тепер у (14) замість χ_E вираз (8), отримаємо залежність $y_E(x_E)$, який і буде рівнянням для границі освітленої ділянки робочої поверхні сенсора.

Результати розрахунку границі активної (освітленої) ділянки робочої поверхні запропонованого сенсора дифузного відбивання світла для заданих параметрів оптичної конфігурації показані на рис. 5.

Як видно з рисунка, освітлена ділянка дійсно має форму еліпса, витягнутого вздовж осі x , причому в напрямку “на-

ляючи тепер у вирази для χ_A, v_A перетворення координат (5) – (7), отримаємо зв’язок між координатами довільної точки A' в площині $xO'y$ робочої поверхні сенсора та координатами відповідної її точки A в площині $\chi\nu\omega$ вхідної грани призми:

$$\chi_A = \frac{f' x_{A'} \cos \psi'}{0,5f' - x_{A'} \sin \psi'}, \quad (8)$$

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

Подібним чином виводяться вирази для зворотного перетворення координат, коли для довільної заданої точки A на вхідній грани призми з координатами (χ_A, v_A) шукаються координати $(x_{A'}, y_{A'})$ її образу A' на робочій поверхні сенсора:

$$x_{A'} = 0,5f' \left(\sin \psi' + \cos \psi' \frac{\chi_A \cos \psi' - f' \sin \psi'}{\chi_A \sin \psi' + f' \cos \psi'} \right), \quad (10)$$

$$y_{A'} = 0,5f' \frac{v_A \cos \psi'}{\chi_A \sin \psi' + f' \cos \psi'}. \quad (11)$$

зад” освітлена ділянка витягнута дещо більше, ніж у напрямку „вперед”.

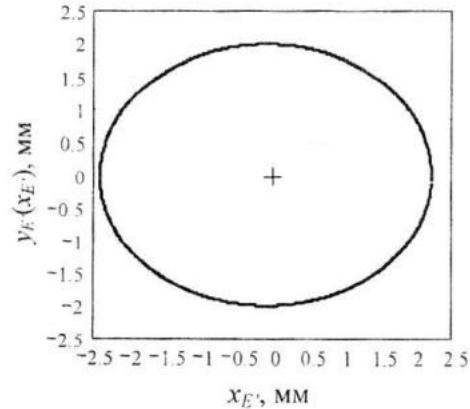


Рис. 5. Форма активної (освітленої) ділянки робочої поверхні сенсора дифузного відбивання світла

Тепер, встановивши границі активної ділянки робочої поверхні сенсора, можна моделювати розподіл інтенсивності світла в межах цієї ділянки. Для цього скористаємося виразом, що апроксимує вузьку діаграму направленості інфрачервоного світлодіода SFH4301 [12], що використовувався в якості джерела світла у

наведеній оптичній схемі:

$$i_0(\gamma) = [S + S \cos^2(k_1 \gamma)] \times \\ \times [10^{-k_2(\gamma - \gamma^*)} \chi(\gamma - \gamma^*) + \chi(\gamma^* - \gamma)], \quad (15)$$

де $S=0,5$, $k_1=2,57$, $k_2=0,033$, $\gamma^*=\pi/180$, а $\chi(\gamma)$ – функція Хевісайда [13].

Кут γ в діаграмі направленості для заданої точки $A(\chi_A, v_A)$ на вхідній грани призми запишеться як

$$\gamma(\chi_A, v_A) = \arctan \frac{\sqrt{\chi_A^2 + v_A^2}}{f_{LS}}. \quad (16)$$

Підставляючи тепер у (16) вирази (8), (9), отримаємо вираз для $\chi(x_A, y_A)$, який у свою чергу підставляємо у вираз (15) для діаграми направленості, отримуючи $i_0[\chi(x, y)]$. Приймаючи у виразі (4) для розподілу інтенсивності світла на активній ділянці робочої поверхні сенсора, згідно з прийнятими допущеннями, $f(x, y) \equiv 1$ та нормуючи його відносно інтенсивності світлодіода I_0 , отримуємо остаточний вираз для чисельного моделювання розподілу інтенсивності світла $i(x, y)$ на активній ділянці робочої поверхні сенсора.

Результати такого чисельного моделювання показано на рис. 6.

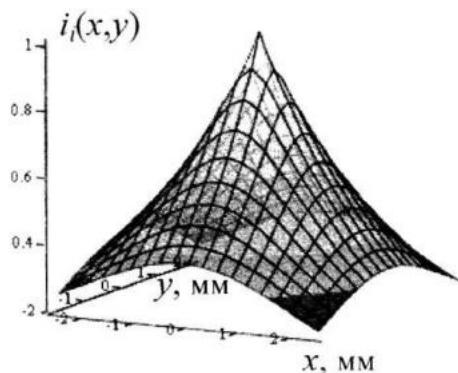


Рис. 6. Розподіл інтенсивності світла на активній ділянці робочої поверхні призматичного сенсора дифузного відбивання світла

Висновки. У статті запропоновано новий компактний призматичний сенсор дифузного відбивання широкого сфокусованого пучка світла дисперсними середовищами, зокрема, аерозольними відкладами. Переваги сенсора полягають, з одного боку, в простоті та надійності оптичної схеми, і в можливості

широкого застосування, а з другого боку, в репрезентативному відображені характеристик досліджуваного середовища без застосування дорогих сканувальних засобів.

Описано оптичну конфігурацію сенсора, що включає прозору призматичну підкладку, а також, конфігурацію зондувального пучка у цій підкладці.

Для вказаної оптичної конфігурації записано функціонал, що зв'язує сигнал сенсора як з розподілом параметрів середовища на робочій поверхні, так і з конфігурацією зондувальних та дифузно відбитих променів, виражену через “апаратну” функцію оптичної схеми сенсора.

Здійснено моделювання одного з компонентів “апаратної” функції, а саме – розподілу вхідної локальної інтенсивності світла на робочій поверхні сенсора, що є одним із визначальних локальних параметрів зондувального пучка, необхідних для коректної інтерпретації сигналу сенсора на основі моделювання локального дифузного відбивання світла. Показано, що для круглого поперечного перерізу зондувального пучка на вхідній грани призматичної підкладки активна (освітлена) ділянка робочої поверхні підкладки буде мати форму еліпса. Виведено співвідношення для відображення локальних параметрів зондувального пучка на вхідній грани підкладки у локальні параметри зондувального пучка на робочій поверхні сенсора, а також співвідношення для розрахунку меж активної ділянки робочої поверхні.

Подальші дослідження дозволять також змоделювати розподіл таких важливих локальних параметрів зондувального пучка сенсора, як кути падіння/заломлення локальних зондувальних променів, а також азимутальні кути їх площин падіння. Знання цих параметрів дозволить коректно будувати локальні системи координат, пов’язані з дифузним відбиванням, та розв’язувати задачі локального моделювання дифузного відбивання світла для будь-якої точки активної ділянки робочої поверхні, на основі яких в подальшому буде розв’язана задача інтегрального моделювання сигналу сенсора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

- Хастунов А.И. Экологические проблемы малых и средних промышленных городов: оценка антропогенного воздействия / А.И. Хва-

- стнов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 1999. – 248 с.
2. Спайзер Ф.И. Болезни легких, обусловленные факторами окружающей среды // В кн. “Внутренние болезни. В 10 книгах. Книга 1. Введение в клиническую медицину” / Т.Р. Харрисон и др. – <http://www.rusmedserver.ru-med/haris/188.html>
 3. Влияние загрязнителей воздуха на растительность. Причины. Воздействие. Ответные меры / Под ред. Х.Г. Десслера. – Москва: Лесная промышленность, 1981. – 181 с.
 4. Monitoring of Particulate Matter in Ambient Air around Waste Facilities. Technical Guidance Document M17. – Environment Agency (UK), 2002. – www.environment-agency.gov.uk
 5. Parra-Guevara D., Skiba Yu.N. Industrial pollution transport. Part 2. Control of industrial emissions // Environmental Modeling and Assessment. – 2000. – v.5. – P.177–184.
 6. Marple V.A., Rubow K.L. Instruments and Techniques for Dynamic Particle Size Measurement of Coal Dust (Bu-Mines; contract H01777026, Univ. MN; OFR 173-83). – 1981. – 242 p.
 7. SCHMITT Industries, Inc. Products & Services. Measurement Systems – <http://www.schmitt-ind.com/products-services-measurement-systems.shtml>
 8. SCHMITT Industries, Inc.
 9. LASERCHECK SURFACE MEASUREMENTS / OPTICAL DIMENSIONS Lasercheck® Surface.Roughness Measurement Gage. Products – http://www.opticaldimensions.com/index_files/Page_2728.htm.
 10. Seiferlin K. MUPUS Proposal Deposition Sensors (MDS, ODS). Instrument Description – <http://ifp.uni-muenster.de/~seiferl/mp415.html>
 11. Сопрунюк П.М., Івасів І.Б., Червінка Л.Є. та ін. Дослідження характеристик півциліндричного оптичного сенсора аналізатора дисперсного складу щільних полідисперсних середовищ // Відбір і обробка інформації. – 2004. – Вип. 20 (96). – С. 50–57.
 12. Soprnyuk P., Ivasiv I. Optical sensor for estimation of disperse composition of dust sediments // Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej. – 2002. – Nr.200. Elektrotechnika, z.24. – S. 137–142.
 13. Leistungsstarke IR-Lumineszenzdiode. High Power Infrared Emitter SFH4301. – http://catalog.osram-os.com/jsp/download.jsp?rootPath=/media/&name=SFH4301_Pb_free_2008_01_14.pdf.
 14. Сопрунюк П.М., Івасів І.Б., Семенюк О.М. Моделювання початкового розподілу інтенсивності зондувального пучка на робочій поверхні напівциліндричного оптичного сенсора дисперсного складу осадів пилу // Системы контроля окружающей среды: Сб. науч. тр. / НАН Украины. МГИ: – Севастополь, 2003. – С. 83–86.