

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОПТИЧНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ РОЗМІРІВ МІКРОЧАСТИНОК

© Бобицький Ярослав, Клімкевич Роман, 2007

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра фотоніки,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Зважаючи на бурхливий розвиток нанотехнологій у різних галузях промисловості і на те, що від розміру частинки значною мірою залежать основні фізичні властивості матеріалу, сьогодні існує потреба у точному, швидкому і неруйнівному методі вимірювання розмірів частинок. Саме оптичні методи вимірювання відповідають усім цим вимогам. Тому подаємо порівняльний аналіз основних оптичних методів, визначення їхніх переваг та недоліків і можливостей застосування у різноманітних системах мікро- та наночастинок.

Из-за быстрого развития нанотехнологий в разных областях промышленности и учитывая то, что от размера частиц в значительной мере зависят основные физические свойства материала, сегодня существует необходимость в точном, быстром и неразрушающем методе измерения размеров частиц. Именно оптические методы измерения соответствуют всем этим требованиям. Поэтому представлено сравнительный анализ основных оптических методов, указано на их преимущества и недостатки и возможности применения в различных системах микро- и наночастиц.

Due to the rapid development of the nanotechnologies in different fields of industry, and taking into consideration that main physical properties of the material depend a lot on particle size, today there is a need in precise, fast and nondestructive method for particles size measurements. Optical measuring methods meet all this requirements. Therefore this article presents comparison analysis of the basic optical methods, indicates their advantages and limitations and the possibility of their application in different micro- and nanoparticle systems.

Вступ. Останнім часом у біомедицині, фармацевтиці, електроніці, оптоелектроніці, хімічній і керамічній промисловостях досліджуються наночастинки зі щораз меншими розмірами і з різноманітним складом матеріалів. Дуже важливими характеристиками для кінцевого споживача є розмір частинки і розподіл розмірів частинок цих матеріалів, оскільки вони впливають на ключові колоїдні властивості, такі, як площа поверхні, густина матеріалу, в'язкість, текучість, швидкість реакції та хімічна активність, стабільність емульсій і суспензій, абразивність сухих порошоків, колір і вигляд колоїдних фарб і покриття паперу, міцність кераміки. Не менш важливим знання цих характеристик є і під час формування матеріалу, оскільки воно дає можливість точно контролювати виготовлення і оброблення колоїдних систем (що дасть змогу створювати нові матеріали з унікальними властивостями)[1].

До впровадження методів вимірювання, основаних на взаємодії світла з частинками, більшість методів полягали або в розділенні зразка (метод

просіювання), або в аналізі обмеженої кількості частинок (мікроскопний метод). Упродовж останніх двох десятиліть, завдяки впровадженню та комерціалізації лазерної техніки та мікроелектроніки (включаючи комп'ютери), наука і технологія вимірювання розмірів частинок сильно розвинулася. Сьогодні багато нових технологій успішно розвиваються і застосовуються для дослідження частинок, тоді як деякі раніше популярні методи поступово перестають застосовуватися. Тому для подальшого активного розвитку нанотехнологій потрібно визначити такі методи вимірювання, які будуть оптимальними для вимірювання розмірів частинок певного матеріалу. Такі методи повинні бути точними, швидкими та неруйнівними і застосовуватися у широкому діапазоні розмірів частинок. Ця стаття описує фізичні основи для цілої низки оптичних методів, які застосовуються для цього. Крім того, аналізуються застереження і переваги цих методів і зроблене посилання на їх використання при випробуванні різних багатофазних систем.

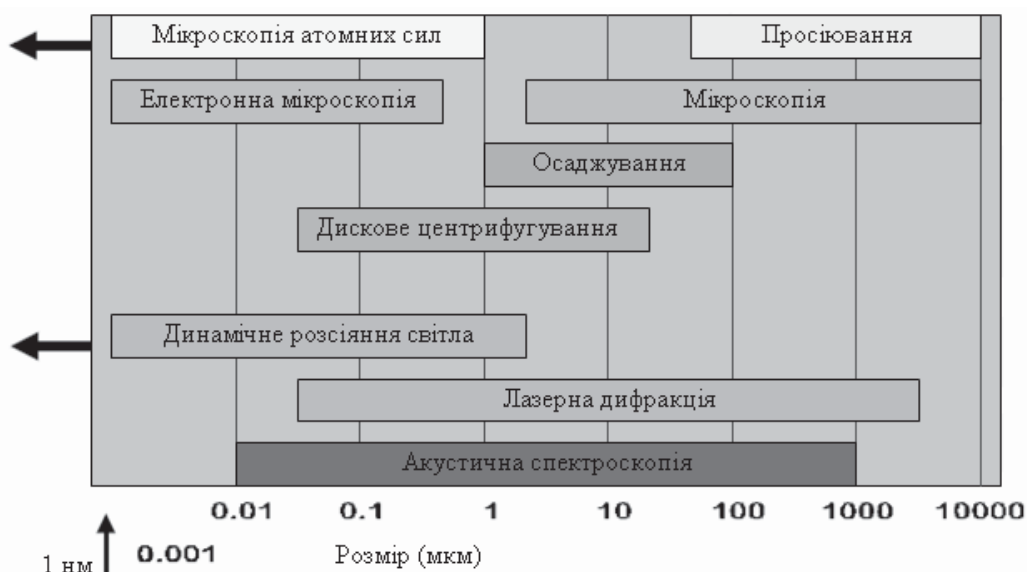


Рис. 1. Діапазони вимірювання розмірів різних частинок

Аналітичні методи, що використовуються для вимірювання розмірів частинок, можна поділити на групові та негрупові залежно від того, чи сигнал отримується від частинок з різними властивостями, чи від частинок з однаковими властивостями протягом кожного вимірювання. Як групові, так і негрупові методи мають певні переваги та недоліки, тому вони часто доповнюють один одного. Переваги групових методів, такі як швидкість і неруйнування, є одночасно недоліками негрупових методів, які є доволі тривалими та руйнують зразок. У групових методах, оскільки сигнал отримується від частинок з різними властивостями, потрібно застосовувати оброблення інформації, який часто потребує моделювання і може бути достатньо складним. Двома найпоширенішими груповими методами для визначення розмірів частинок є динамічне розсіяння світла та лазерна дифракція. З іншого боку, на відміну від низької роздільної здатності групових методів, перевага негрупових методів у високій роздільній здатності. Для негрупових методів матеріал перед вимірюванням повинен бути розділений відповідно до певної властивості, тому всі негрупові методи повинні включати механізм розділення. Залежно від методу розділення вимірювання можуть визначати одну частинку за один момент часу або групу частинок, які мають однакове значення розміру. Двома типовими методами, які використовують вимірювання однієї частинки, є оптичне підрахування частинок і принцип Coulter (метод електрочутливої зони) [2].

Вибір відповідного аналітичного методу залежить від вимог до застосування і доступності відповідної техніки. Тому користувачі часто повинні йти на компроміс, вибираючи оптимальний метод для вимірювання розмірів потрібних частинок.

1. Метод динамічного розсіяння світла. Одним з найпоширеніших методів, що використовуються для характеристики колоїдних розчинів, є динамічне розсіяння світла (ДРС), також відоме як фотонна кореляційна спектроскопія (ФКС) і квазіеластичне розсіяння світла (КЕРС). В останні роки цей метод розвинувся у потужний інструмент для дослідження розподілів розмірів субмікронних частинок у рідких розчинах. Він є одним з найвідоміших, неруйнівних, відтворюваних фізико-хімічних методів, що використовуються для характеристики і вивчення полімерів і колоїдів. Інструменти, що побудовані на цій технології, успішно використовуються як в науковій роботі, так і під час виготовлення чи оброблення для аналізу різноманітних продуктів, що базуються на суспензіях частинок з діапазоном діаметрів від 2 нм (20 ангстрем) до приблизно 2–3 мкм. Можливими застосуваннями цього методу є полімери латексу, колоїдний кремній, пігменти і барвники, олійні і водні емульсії, міцели і мікроемульсії, протеїни та інші макромолекули, що мають біологічне значення.

Динамічне розсіяння світла пов'язане з часовою поведінкою інтенсивності світла, розсіяного від ансамблю частинок, розчинених в рідині. Метод ДРС

визначає флуктуації інтенсивності розсіяного світла, які зумовлені дифузією або броунівським рухом частинок незалежно від ефективності, з якою вони розсіюють світло. Отже, цей метод відрізняється від класичного розсіяння світла, яке пов'язане тільки з середньою інтенсивністю розсіяного світла, з якої можна визначити середню молекулярну масу частинок. Відносне розташування частинок в розсіювальному об'ємі у кожен момент визначає рівень конструктивної або деструктивної інтерференції розсіяного світла на детекторі. Оскільки величина дифузії, або швидкість частинок визначається їхнім розміром (якщо в'язкість рідини і температура відомі і сталі), інформація про розмір міститься у величині флуктуацій інтенсивності розсіяного світла. Нижня межа вимірювання розмірів частинок визначається інтенсивністю розсіювання і інструментальним шумом. Щоб отримати правильні результати, флуктуації вимірюваного розсіювання повинні бути більшими, ніж шум від джерел, включаючи зовнішні впливи, флуктуації температури, і шум електроніки. Верхня межа вимірювання розмірів частинок визначається переважно осадом. Частинок повинні бути стабільно розташовані в зразку, оскільки частинки, які осідають, мають направлений рух, що вносить ускладнювальну інформацію у флуктуації розсіювання. Практично верхня межа для експерименту ДРС становить декілька мкм залежно від густини матеріалу і в'язкості розчинника, а нижня межа становить декілька нм залежно від різниці показників заломлення між частинками і розчинником.

Броунівський рух частинок спостерігають, використовуючи лазер і автокорелятор, для вимірювання коливань інтенсивності розсіяного світла, і далі визначають середнє значення коефіцієнта дифузії. Світло від когерентного джерела – зазвичай 5 мВт HeNe лазера – фокусується на кювету в якій розміщена розчинена суспензія частинок. Температура оптичної комірки підтримується сталою за допомогою термоелектричного елемента Пельтьє. Останнім часом як джерела світла використовуються діодні лазери, оскільки вони дешевші, мініатюрніші і мають можливість з'єднання з оптичними волокнами. Як оптична комірка може використовуватися проста квадратна або кругла кювета, або складніша кювета з кращою температурною стабільністю і вищою оптичною якістю. Типовий об'єм зразка становить декілька мілілітрів або менше. Частинок у розсіювальному об'ємі, який роз-

міщений на перетині світлового пучка і приймальної оптики, розсіюють світло в усіх напрямках.

Залежність флуктуацій розсіяної інтенсивності від часу визначається розміром частинок. Малі частинки дифундують порівняно швидко, зумовлюючи швидкі флуктуації сигналу розсіяної інтенсивності. З іншого боку, більші частинки дифундують повільніше, зумовлюючи повільнішу зміну сигналу $I_{\text{заг}}$ з часом. Звичайно, легкість, з якою частинки цього діаметра можуть дифундувати у рідині, залежить не тільки від їхнього розміру, а також від в'язкості рідини.

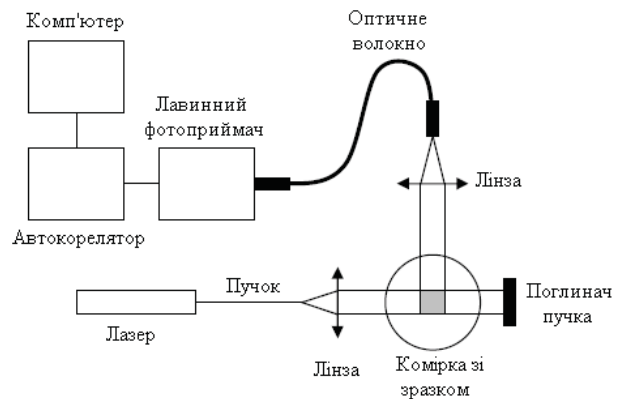


Рис. 2. Схема установки для методу динамічного розсіювання світла

Радіус частинок можна визначити, знаючи величину дифузійності, за допомогою відношення Ейнштейна–Стокса:

$$D = kT / 6\pi\eta R,$$

де k – стала Больцмана, η – в'язкість рідини суспензії. Дифузійність D загалом зростає зі зростанням температури T , передусім через температурну залежність в'язкості розчинника. Зміни температури неможливо відрізнити від змін радіуса частинки R – вони обидва впливають на D . Отже, температура зразка повинна бути сталою (і відомою) для того, щоб отримати точне вимірювання D , і відповідно R .

Загалом, досліджувані суспензії містять більше ніж один розмір, вони займають порівняно великий діапазон діаметрів частинок. У такому разі метою методу ДРС є аналіз флуктуацій сигналу розсіяної інтенсивності та отримання наближеного розподілу дифузійностей частинок, з якого може бути отриманий розподіл розмірів частинок.

Відношення Ейнштейна–Стокса, яке пов'язує дифузію з розміром частинки через фізичні константи та експериментальні параметри, використовується, для визначення розміру, якщо відомий коефіцієнт дифузії.

У разі монодисперсного розподілу розміру визначення дифузії є простим, оскільки з аналізу даних потрібно тільки зробити розклад по одній експоненціальній функції. Проте введення полідисперсії в зразок, а відтак і рівняння, що використовуються, щоб отримати інформацію від автокорелятора швидко, роблять аналіз одночасно складнішим і менш стійким.

Зауважимо, що ДРС не вимірює розмір безпосередньо, а визначає коефіцієнт дифузії. Тоді робляться певні припущення, що дають змогу обчислити розмір [6]. Якщо визначити це застереження, можливість неправильної інтерпретації зменшується. Дійсно, є випадки, де оцінка дифузійних коефіцієнтів тільки методом ДРС за певних умов розв'язку є достатньою для кількісного моделювання взаємодій між частинками таких субмікронних колоїдів, як міцели та емульсії.

ДРС застосовується насамперед до тих систем, що складаються з субмікронних частинок, таких, як парентеральні емульсії і ліпосоми. Крім того, здатність виявити частинки діаметром 3 нм робить метод одним з небагатьох, що можуть використовуватися, щоб безпосередньо спостерігати міцели. Якщо мікроемульсії досліджуються цим методом, вимога, що зразок повинен бути оптично тонким, може зумовити розчинення зразка у 500 разів або більше. Такі розчинення можуть порушити будь-яку колоїдну систему, а мікроемульсії, які за визначення є системами в термодинамічній рівновазі, особливо чутливі. Щоб зменшити потребу у таких розчиненнях, були введені нові підходи, такі, як використання волоконно-оптичних давачів, і такі системи є комерційно доступними. [7]

2. Лазерна дифракція. Сьогодні для вимірювання розмірів частинок у багатьох застосуваннях широко використовуються методи лазерної дифракції. Успіх цього методу ґрунтується на тому, що він може застосовуватися для різних видів систем, що містять частинки, є швидким і може бути автоматизованим. Проте для отримання точних результатів потрібна правильна інтерпретація отриманих результатів, оскільки методом лазерної дифракції вимірюється не безпосередньо розмір частинки, а світло, розсіяне частинкою. Відношення між розсіяним світлом і обчисленим розподілом частинок залежить від припущень про оптичні властивості досліджуваного матеріалу.

Метод лазерної дифракції ґрунтується на явищі розсіювання світла частинками в усіх напрямках:

спостерігається дифракційна картина розподілу інтенсивності, яка залежить від розміру частинки. У цьому методі інтерференційна картина проектується на поверхню двовимірного детектора, причому лазерне світло проходить через зразок, поміщений між детектором і джерелом світла. Массив детекторів підсумовує всі розподіли розсіяного світла від окремих частинок в ансамбль. Розподіл енергії, виміряний у радіально розташованих сенсорних елементах, аналізується і на його основі розраховується розподіл частинок за розмірами. Цей розрахунок може здійснюватися як за теорією Фраунгофера, так і за теорією Мі [9, 10].

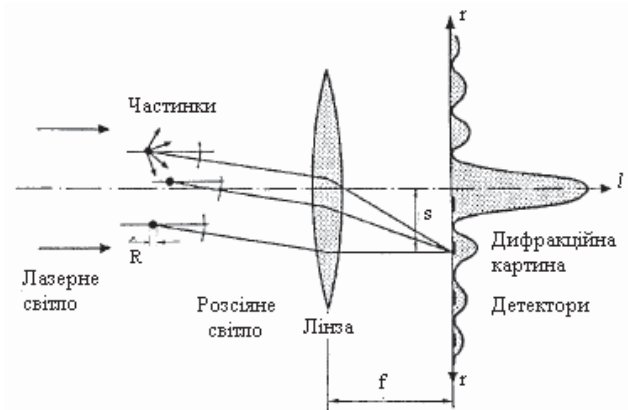


Рис. 3. Метод лазерної дифракції

Лазерна дифракція володіє низкою важливих переваг перед "класичними" методами вимірювання, такими, як просіювання, седиментація або аналіз за зображенням: короткий час виконання аналізу, хороша відтворюваність і точність, просте калібрування, більший діапазон вимірювань і велика гнучкість. Простота роботи з інструментом, висока типова продуктивність, і менш строгі вимоги для розчинення зумовили використання методу для характеристики емульсій, наночастинок, ліпосом і флокулярних систем. Проте суворе застосування теорії Фраунгофера вимагає, щоб частинки були оптично щільними і більшими, ніж 2 мкм у діаметрі [11, 12].

3. Статичне розсіювання світла. Цей метод є удосконаленням методу лазерної дифракції, зумовленим тим, що упродовж останніх років:

1) Розсіювання світла не обмежується тільки ефектами дифракції. Використовуються загальніші підходи, основані на теорії розсіювання Мі для вимірювання інтенсивності розсіяння у ширшому

діапазоні кутів. Діапазон розмірів розширений до субмікронної області.

2) Використання джерела світла з неперервними довжинами хвиль (білим світлом) на доповнення до основного лазерного джерела, щоб отримати більше інформації про субмікронні частинки, ґрунтуючись на залежності розсіяної інтенсивності від довжини хвилі та поляризації.

Отже, діапазон вимірюваних цим методом розмірів становить 0,04 – 2000 мкм.

Історично лазерна дифракція враховувала тільки малі кути, до 14° , що обмежувало застосування методу розміром близько 1 мкм. Причиною цього обмеження було те, що менші частинки розсіюють переважно на більші кути. Однак цей метод розширювався, завдяки включенню більшого діапазону кутів і застосуванню теорії Мі, на додаток до теорій наближення, таких, як теорія Фраунгофера та аномальної дифракції. Теорія Фраунгофера ґрунтується на дифракції на краях частинок. Вона підходить тільки для повністю поглинаючих частинок і малих кутів розсіяння. Для розмірів частинок у межах довжини хвилі і менше припущення Фраунгофера про сталий коефіцієнт екстинкції вже несправедливе. Для урахування оптичних властивостей частинок використовується теорія Мі. Ця теорія описує випромінювання для всіх просторових напрямків і навколо гомогенної сферичної частинки в гомогенному, неабсорбувальному середовищі. Частинки можуть бути прозорими чи повністю адсорбувальними.

Теорія Мі стверджує, що розсіяння світла ґрунтується на явищі резонансу. Якщо промінь світла з певною довжиною хвилі потрапляє на частинку, то частинка – залежно від відношення довжини світлової хвилі до її діаметра і залежно від коефіцієнтів заломлення частинки і середовища – здійснює електромагнітні коливання на тій самій частоті, що і світло, яке її збуджує. Частинка віддає отриману енергію у вигляді розсіяного світла з певним розподілом у тілесному куті. Згідно з теорією Мі можливі декілька коливальних станів з різною ймовірністю, і існує зв'язок між оптично активним перерізом і розміром частинок, довжиною світлової хвилі і показниками заломлення частинки і середовища. Тому для використання теорії Мі повинні бути відомими показники заломлення та коефіцієнти поглинання частинки і середовища.

Більшість сучасних інструментів уможлиблює вимірювання на більших кутах розсіювання, деякі аж

до 150° , за допомогою, наприклад, застосування збіжного пучка, більшої кількості або ширших лінз, другого лазерного променя або більшої кількості детекторів. Так можна вимірювати менші частинки, розміром близько 0,1 мкм. Деякі інструменти включають додаткову інформацію про інтенсивність розсіяння і різницю інтенсивностей при різних довжинах хвиль і площинах поляризації для того, щоб покращити визначення розмірів частинок у субмікронному діапазоні.

Статичне розсіювання світла (СРС) здійснюється освітлюванням зразка пучком світла і вимірюванням інтенсивності розсіяного випромінювання як функції кута і концентрації розсіювача. Тому у методі повністю і суворо виконано математичні і геометричні вими, що диктуються теоріями Мі і Релея–Ганса–Дебая (РГД). Апаратура, що проектується спеціально для цієї мети загалом, включає лазер як джерело світла, доступні кути спостереження від 10° до 170° , і багатоканальне детектування [13].

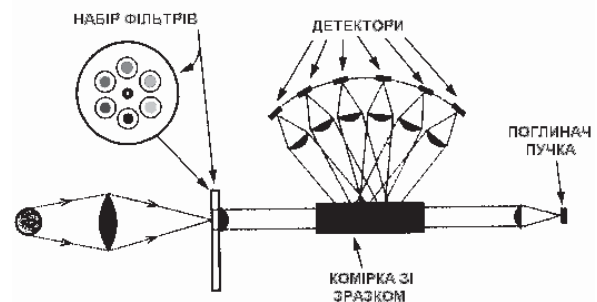


Рис. 4. Схема установки із використанням поляризаційної залежності розсіяного світла

Світло від джерела білого світла проходить через фільтри з декількома довжинами хвиль і двома поляризаціями. Розсіяне світло приймається детекторами, розташованими в діапазоні кутів $60\text{--}145^\circ$. Після закінчення вимірювання значення, отримані на детекторах, послідовно при різних довжинах хвиль і різних поляризаціях записуються в файл даних і в поєднанні з даними, отриманими методом розсіяння вперед, дають змогу вимірювати розміри частинок близько десятків нанометрів [14].

Теорії, що використовуються, для отримання інформації про розмір з даних СРС, складні, але володіють роздільною здатністю, кращою, ніж в дифракції Фраунгофера, і ґрунтуються на інших застосуваннях

розсіювання світла, ніж теорії ДРС. На жаль, СРС стикається з деякими з таких самих математичних труднощів, як ДРС, коли розглядаються зразки з полідисперсією розмірів, наприклад, з'являється нестабільність результатів, ймовірність яких зменшується, якщо наявна попередня інформація про зразок [15].

4. Оптичне визначення однієї частинки. Цей метод є одним з основних, що використовуються для моніторингу довкілля і контролю багатьох матеріалів, що складаються з частинок. Через здатність виконувати вимірювання "на місці" метод визначення однієї частинки широко використовується для аналізу забруднень (наприклад, води, чистих кімнат, гідравлічних рідин) і аналізу рідких та газоподібних частинок в атмосфері. У такому разі розподіл розмірів є менш важливим, ніж концентрація частинок з розмірами, які перевищують деякий визначений поріг. У багатьох застосуваннях, які вимагають точного контролю у певному діапазоні розмірів частинок, оптичне визначення однієї частинки є незамінним для перевірки якості продукту. Метод оптичного визначення однієї частинки є, можливо, єдиним методом реального часу, який може бути використаний для отримання інформації незалежно від того, чи всі частинки досліджуваного матеріалу потрапляють у певні визначені межі діапазону розмірів. Одночасне підрахування, вимірювання розмірів та ідентифікація матеріалу "на місці" з використанням окремих частинок в зразку є тими характеристиками, які активно розвиваються сьогодні.

Вимірювання окремих частинок через їхню взаємодію зі світлом застосовувалося багато років. Сучасний метод оптичного визначення однієї частинки використовує як розсіяння світла від окремих частинок для вимірювання малих частинок (деколи від 50 нм), так і поглинання світла, зумовлене наявністю частинок в пучку світла для вимірювання великих частинок (до 1 мм). Частинки можуть бути у формі аерозолів, сухих порошоків або рідких суспензій.

У цьому методі індивідуальні частинки, що проходять через давач, розподіляються за розмірами на основі змін в оптичному сигналі, які виникають при їхній наявності. У результаті ми отримуємо сортування величини фотоструму, створюючи гістограму, що передає розподіл розмірів частинок у тій частині зразка, що проходить через давач. Відповідно, якщо досліджено достатню кількість частинок, можна отримати повне розуміння розподілу розмірів частинок, без

необхідності застосування математичних моделей для одержання результатів експериментальних даних. Недоліком є те, що точність розподілу розмірів у діапазонах з невеликою кількістю частинок мала через статистичну невпевненість, що відзначається при розрахунку низькоїмовірнісних подій. Крім того, розміри потрібно відкалібрувати згідно із еталонами, переважно тими, що мають оптичні характеристики, подібні до оптичних характеристик зразка [16].

Першочерговою проблемою у разі використання методів визначення однієї частинки є можливість одночасної наявності двох або більше частинок в детекторі, що призводить до неправильної інтерпретації розподілу розмірів. Такі збіги загалом виявляються наявністю нелінійності в концентраційній залежності і усуваються розчиненням зразка доти, доки це перестане бути статистичною проблемою. Проте, як і для розсіювання світла, це розчинення може зумовити відхилення складу зразка від його початкового стану.

5. Інші методи. Описані вище методи мають певні недоліки, тому подальші дослідження спрямовані на удосконалення цих методів. Добре відомою проблемою для методів, що ґрунтуються на вимірюваннях інтенсивності розсіювання, є неоднорідний профіль спадного гауссоподібного лазерного пучка. Щоб усунути цю невизначеність гауссоподібного пучка, було запропоновано декілька методів з використанням абераційних лінз, сегментованих масивів клинів, обернено-гауссівських пропускних фільтрів і поляризаційно-селективних дифракційних фазових елементів. Однак майже всі ці методи значно зменшують інтенсивність падіння, обмежуючи у такий спосіб визначальну здатність системи. Гауссівську невизначеність можна усунути за допомогою схеми інверсних матриць, однак цей метод залежить від траєкторії частинок. Є різні методи вимірювання швидкості частинки. Ці методи включають фотографування і розсіювання частинками, що перетинають проектовані ґратки. Варіант останнього методу – лазерна доплерівська велосиметрія (ЛДВ), в якій ґратки формуються двома лазерними променями, що перетинаються. Фотографія може одержати швидкості в широкій області, але пов'язана з труднощами в аналізі розподілу розмірів частинок, особливо для малих частинок. Ґраткові методи звичайно вимірюють тільки один компонент швидкості, ортогональної до ліній. Це можна подолати за допомогою двоколірної ЛДВ, де дві

ґратки сформовані під прямим кутом одна до одної і сигнали розділяються за допомогою дискримінації довжини хвилі. ЛДВ може вимірювати розміри частинки, але тільки в обмеженому діапазоні. Удосконаленням ЛДВ є фазова доплерівська анемометрія (ФДА). Цим методом можна вимірювати швидкість, а також розмір в широкому динамічному діапазоні. Як ЛДВ, так і ФДА у певних межах є нечутливими до гауссоподібного профілю променя [17].

Головною перевагою цього методу є його простота і відсутність потреби юстування. Під час вивчення випробуваній простір складався з двох ортогонально поляризованих паралельних променів. Визначали інтенсивність, що падає на частинку, використовуючи певний алгоритм, розроблений для відтворення швидкості і напряму. Було прийнято, що частинки малі порівняно з шириною гауссівських променів, отже, розсіяння з розміром частинки. Калібрування системи виконувалося за допомогою сертифікованих сферичних частинок.

Останнім часом для визначення розмірів частинок у концентрованих суспензіях застосовуються нові методи, що ґрунтуються на багатократному розсіянні світла, такі, як спектроскопія дифузної хвилі та акустична спектроскопія. Ще одним потенційним методом для оперативного дослідження багатократного розсіяння концентрованих колоїдних суспензій є метод фотонної міграції [18, 19]. Оскільки цей метод визначає характеристики поширення, що залежать від часу, а не величину інтенсивності, він є самокаліброваним і не потребує зовнішнього калібрування. Крім того, метод фотонної міграції уможливорює незалежне визначення поглинання і розсіяння. Як наслідок, на характеризованні колоїдних розсіювачів не впливають зміни поглинання світла чи колір рідини суспензії. Оскільки цей метод залежить від багатократного розсіяння світла, він обмежений для нерозчинених частинок суспензій, через те, що суспензії є переважно непрозорі. Як розподіл розмірів так і об'ємні частки можна отримати за допомогою алгоритмів інверсії, де єдиним фізичним параметром, який необхідний, є відносний показник заломлення між частинкою і середовищем. Оскільки розчинення не є необхідним для уникнення багатократного розсіяння, фотонна міграція придатна для оперативного контролю розподілу розмірів частинок.

Висновок. Аналіз показує, що дослідники мають у своєму розпорядженні багато оптичних методів.

Проте, оскільки багатофазні субмікронні препарати – це складні системи, які можуть охопити діапазон розмірів від 10 нм до 10 мкм, потрібно визначити групу методів і підходів, які при сумісному використанні можуть повніше характеризувати розподіл розмірів частинок в цьому діапазоні краще, ніж міг би будь-який єдиний метод. Використання різноманітних додаткових технічних підходів дає змогу досягти надійніших результатів, проте отримання точної і повної інформації про зразок можливе, тільки якщо використовуються різні методи, які ґрунтуються на фундаментально різних принципах.

1. Haskell R.J. *Characterization of Submicron Systems via Optical Methods // Journal of Pharmaceutical Sciences. February 1998. Vol. 87, No. 2. P. 125–129.*
 2. Finsy R.; De Jaeger N. *Particle Sizing by Photon Correlation Spectroscopy Part II: Average Values. // Part. Part. Syst. Charact. 1991. 8. P. 187–193.*
 3. Myers D. *Surfaces, Interfaces and Colloids // VCH Weinheim. 1991.*
 4. Dickinson E. *Emulsions and Droplet Size Control. In Controlled Particle, Droplet and Bubble Formation // Wedlock, D. J., Ed.; Butterworth-Heinemann: Oxford. 1994. P. 189–216.*
 5. Stock R. S.; Ray W. H. *Interpretation of Photon Correlation Spectroscopy Data: A Comparison of Analysis Methods // J. Polym. Sci. Polym. Phys. 1985. 23. P. 1393–1447.*
 6. Pecora R., Ed. *Dynamic Light Scattering: Applications of Photon Correlation Spectroscopy // Plenum: New York. 1985.*
 7. Dhadwal H. S.; Ansari R. R.; Meyer W. V. *A Fiber-Optic Probe for Particle Sizing in Concentrated Suspensions // Rev. Sci. Instrum. 1991. 62. P. 2963–2968.*
 8. Hunter R. J. *Zeta Potential in Colloid Science // Academic Press: London. 1981.*
 9. Felton P. G. *A Review of the Fraunhofer Diffraction Particle-Sizing Technique // ASTM Spec. Technol. Publ. 1990. 1083 (Part. Size Meas. Technol.: 2nd Vol.). P. 47–59.*
 10. Nascimento C. A. O.; Guardani R.; Giulietti M. *Use of Neural Networks in the Analysis of Particle Size Distributions by Laser Diffraction // Powder Technol. 1997. 90. P. 89–94.*
 11. De Boer G.; De Weerd C.; Thoenes D.; Goossens H. W. J. *Laser Diffraction Spectrometry: Fraunhofer Diffraction Versus Mie Scattering // Part. Charact. 1987. 4. P. 14–19.*
 12. U. Teipel *Problems in Characterizing Transparent Particles by Laser Light Diffraction Spectrometry // Chem. Eng. Technol. 2002. 25. P. 13–21.*
 13. Egelhaaf S. U.; Schurtenberger P. *A Fiber-Optics-Based Light Scattering Instrument for Time-Resolved Simultaneous Static and Dynamic Measurements // Rev. Sci. Instrum. 1996. 67. P.*

- 540–545. 14. Puertas A. M.; de las Nieves F. J. A New Method for Calculating Kinetic Constants Within the Rayleigh-Gans-Debye Approximation From Turbidity Measurements // *J. Phys. Condens. Matter*. 1997. 9. P. 3313–3320. 15. Eliçabe G.; Frontini G. Determination of the Particle Size Distribution of Latex Using a Combination of Elastic Light Scattering and TurbidimetrySA Simulation Study // *J. Colloid. Interface Sci.* 1996. 181. P. 669–672. 16. Kollenberg, R. G.; Veal, D. L. Optical Particle Monitors, Counters, and Spectrometers: Performance Characterization, Comparison, and Use // *J. IES*. 1992. 35. P. 64–81. 17. L. Vamos, P. Jani Simulation of LDA and LPA measuring techniques in the nanometer particle size range // *Proc. of SPIE*. 2005. Vol. 5948, 59481Q. 18. Huabei Jiang Enhanced Photon-Migration Methods for Particle Sizing in Concentrated Suspensions // *AIChE Journal* August. 1998. Vol. 44, No. 8. 19. Z. Sun, E. M. Sevick-Muraca Inversion Algorithms for Particle Sizing with Photon Migration Measurement // *AIChE Journal*. July 2001. Vol. 47, No. 7. P.1487–1498. 20. J. L. Castagner, A. R. Jones A Double Gaussian Beam Method for the Determination of Particle Size, Direction and Velocity // *Part. Part. Syst. Charact.* 2004. 21. P. 5 – 14. 21. T. Hubner, S. Will, A. Leipertz Determination of Particle Mass Density Distribution // *Part. Part. Syst. Charact.* 1999. 16. P. 85–91. 22. E. Astrakharchik-Farrimond, B. Y. Shekunov, N. B. E. Sawyer Particle Imaging Using a Transmission Wide-Field Phase Confocal Microscope // *Part. Part. Syst. Charact.* 2003. 20. P. 104 – 110. 23. E.F. Venger, A.V. Goncharenko, M.L. Dmitruk Optics of small particles and disperse media // *Naukova dumka*, Kyiv. 1999. 24. C. Y. Wang, S.-P. Pan, G.-S. Peng A comparison study on the measurement of nanoparticles // *Proceedings of SPIE*. 2005. Vol. 5879 (SPIE, Bellingham, WA). 25. V. A. Bogatyrev, L. A. Dykman, B. N. Khlebtsov, A. V. Alekseyeva Gold nanoparticle sizing based on differential static light scattering spectroscopy, absorption spectroscopy, and dynamic light scattering // *Proc. of SPIE*. 2004. Vol. 5475 (SPIE, Bellingham, WA). 26. V. Jacobsen, P. Stoller, C. Brunner, V. Vogel, V. Sandoghdar Interferometric optical detection and tracking of very small gold nanoparticles at a water-glass interface // *Optics express*. January 2006. Vol. 14, No. 1. P. 405–414. 27. P. Jam, A Nagy, A. Czitrovsky Nano-particle Size Distribution Measurement in Photon Correlation Experiments // *SPIE*. August 1999. Vol. 3749. 28. S. Sudo, Y. Miyasaka, K. Otsuka Quick and easy measurement of particle size of Brownian particles and plankton in water using a self-mixing laser // *Optics express*. February 2006. Vol. 14, No. 3. P. 1044–1055. 29. D. Buzatu, O. Annunziata, E. Petrescu, C. Popa, F. D. Buzatu Dynamic light scattering: a useful optical method to probe common-ion effects in protein-salt aqueous solutions // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. December 2005. Vol. 7, No. 6. P. 3161 – 3168. 30. R. H.Ottewill Experimental methods of particle characterization // *Pure&Appl. Chem*. 1992. Vol. 64, No. 11. P. 1697–1702. 31. K. Meigas Method for small particle detection by laser // *Opt. Eng.* September 1998. 37(9). P. 2587–2591.

УДК. 620.179

СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО ТИСКУ

© Тихан Мирослав, 2007

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра приладів точної механіки,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Пропонується спосіб вимірювання динамічного тиску, котрий дає змогу здійснювати вимірювання у реальному масштабі часу.

Предлагается способ измерения динамического давления, позволяющий осуществить измерение в реальном масштабе времени.

The method of dynamic pressure measurement which give a possibility measurement in real time has been proposed.

1. Вступ. Сучасні високотехнологічні галузі техніки – теплоенергетика, енерготранспортування та енергооблік, аерокосмічна промисловість, двигунобудування та інші, що можуть існувати і розвиватися