

Л.В. Іванченко, В.Б. Осіс, А.В. Силаєв, Л.М.Товстенко

**ПОТОКОВИЙ СПЕКТРОМЕТР АТМОСФЕРНОГО АЕРОЗОЛЮ**

Розглянуто конструкцію, принцип дії та характеристики потокового конденсаційного фотоелектричного вимірювача спектра розмірів та концентрації частинок субмікронних аерозолів.

**Вступ**

Атмосферний аерозоль є активним компонентом атмосфери, який істотно впливає як на природні процеси в навколишньому середовищі, так і на господарську діяльність та побут людини. Характер цього впливу визначається в першу чергу концентрацією аерозольних частинок та розподілом їх за розміром. Здебільшого для знаходження спектра розмірів частинок застосовують гравітаційне чи примусове осадження їх на підкладинку з подальшим вимірюванням за допомогою оптичного або електронного мікроскопа. Цей метод дає досить надійні результати, проте він трудомісткий і незручний для оперативних досліджень. У цьому відношенні значні переваги мають потокові методи у поєднанні з фотоелектричними, електростатичними та дифузійними засобами реєстрації. Однак фотоелектричний метод ефективний лише у тому разі, коли розміри аерозольних частинок перевищують 0,2 мкм, а електростатичний та дифузійний — коли вони менші від 0,2 мкм.

Можливості фотоелектричного методу можна розширити за рахунок попереднього конденсаційного укрупнення частинок аерозолю у потоці зволоженого повітря з контрольованою зміною пересичення водяної пари. Згідно з відомим рівнянням Кельвіна, крапля будь-якої рідини перебуває у рівновазі з її паром, якщо:

$$\ln \frac{p}{p_{\infty}} = \frac{2\sigma M}{\rho R T r^*},$$

де  $p$  і  $p_{\infty}$  – тиск пари відповідно над поверхнею краплі та плоскою поверхнею рідини,  $\sigma$ ,  $M$  та  $\rho$  – відповідно поверхневий натяг, відносна молекулярна маса та густина,  $R$  – універсальна газова стала,  $T$  – абсолютна температура,  $r^*$  – рівноважний радіус краплі. За постійного

пересичення  $p/p_\infty$  краплі з  $r < r^*$  випаровуються, а з  $r > r^*$  – необмежено ростуть.

Частинки атмосферного аерозолі здебільшого мають водяну оболонку або є гідрофільними [11]. Отже, за умови існування пересичення водяної пари у повітрі вони ростимуть у відповідності з рівнянням Кельвіна (з тією точністю, з якою розмір частинки можна охарактеризувати радіусом рівновеликої сфери). З цього випливає, що визначення розподілу частинок за рівнем пересичення дає певну інформацію про спектр їх розмірів.

На основі закономірностей конденсаційного росту аерозольних частинок у пересиченій водяній парі створено цілу низку приладів для визначення характеристик аерозолів. У лабораторній і польовій практиці широкого застосування набули лічильники так званих ядер Айткена, тобто частинок атмосферного аерозолі у діапазоні діаметрів від 0,002 до 0,2 мкм [9, 10]. У лічильнику конструкції самого Дж. Айткена та подальших його модифікаціях (лічильники Дж. Шольца, П.Дж. Нолана і Л.В. Поллака, Б. Воннегата, Т.А. Річа тощо) пробу аерозолі набирають у герметичну зволожену камеру, де внаслідок раптового розширення повітря (за рахунок збільшення об'єму камери або зменшення в ній тиску) виникає пересичення водяної пари. Завдяки цьому на ядрах Айткена утворюються досить крупні краплі води, щоб їх концентрацію можна було визначити за допомогою лупи, фотокамери чи фотоелемента.

Зі збільшенням ступеня розширення (тобто з ростом пересичення) концентрація крапель збільшується доти, доки всі присутні частинки не спрацюють як центри конденсації. Айткен першим спробував використати цю закономірність для дослідження розподілу ядер за пересиченням, вимірюючи їх концентрацію в тій самій пробі на стадіях послідовного збільшення ступеня розширення в камері лічильника. Б.Дж.Мейсон [9] піддав сумніву результати цих дослідів на тій підставі, що внаслідок занадто малого об'єму камери лічильника (лише 6 см<sup>3</sup>) не виключена можливість неконтрольованих втрат малоактивної частини ядер за час тривалої процедури експерименту.

Існують дві моделі лічильника Шольца з камерами об'ємом відповідно 100 і 187 см<sup>3</sup>. Можна було сподіватися, що втрати ядер в них мають бути істотно меншими, ніж в лічильнику Айткена. Проте, як показано в роботі [10], процес розширення у лічильнику Шольца не є адіабатичним, тому величини пересичення не можуть бути адекватними

ступеням розширення. Не були вдалими також спроби Р.Нісснера зі співавторами [16] використати для цієї мети лічильник Нолана і Поллака.

Більш перспективними у цьому плані є потокові лічильники ядер конденсації [14, 17], в яких проба досліджуваного аерозолю безперервно проходить через вимірювальну камеру. Пересичення водяної пари в камері досягається за рахунок охолодження її зовнішньої поверхні. Концентрація ядер визначається фотометруванням світлового потоку, розсіяного сукупністю утворених крапель. Оскільки пересичення змінюється як вздовж осі камери, так і в будь-якому її поперечному перерізі, активація ядер відбувається за різних значень пересичення. З цієї причини лічильники подібного типу неможливо безпосередньо використати для визначення розподілу ядер за пересиченням, проте поєднання їх з дифузійною батареєю дає змогу визначати спектр розмірів частинок високодисперсних аерозолів.

А.Г.Лактіонов [7] істотно удосконалив поточковий лічильник, створивши камеру, в якій досліджуваний аерозоль проходить у проміжку між двома вертикальними коаксіальними циліндрами, поверхні яких покриті змоченим фільтрувальним папером і підтримуються при різних температурах. Розрахункові значення пересичення можна задавати у діапазоні від 0 до 4%. Недоліком розробки, на наш погляд, стало використання для реєстрації водяних крапель фотоелектричного лічильника, проградуйованого за краплями нелеткої речовини (трансформаторного масла). Це не дало змоги отримати надійне співвідношення між розподілом ядер за рівнем пересичення та спектром їхніх розмірів. Зарадити справі могло б використання методики градуювання, запропонованої в роботах [1, 2].

Певні переваги перед звичайними повнопоточковими лічильниками мають прилади, в яких реалізовано струменевий варіант методу [3, 6, 13]. Суть його полягає в тому, що досліджуваний аерозоль вводиться в ламінарний потік повітря, ретельно очищеного від побічних аерозольних домішок, у вигляді тонкого супутнього струменя, розташованого точно по осі конденсаційної камери, де сформована зона стабільного пересичення водяної пари. У разі камери горизонтальної будови зручно визначати спектр ядер за характером гравітаційного розшарування струменя крапель, що виростили на цих ядрах [3]. У вертикальних камерах для вимірювання концентрації краще використовувати фотоелектричний лічильник окремих крапель [4], що дає змогу уникнути необхідності

градування приладу за концентрацією тестового аерозолю. Саме цей принцип застосовано в лабораторній установці для визначення загальної концентрації високодисперсних аерозолів [5] — на відміну від повнопотокового лічильника ядер Дж.Агарвала і Ф.Сема [14], що потребує такого градування. На базі стаціонарної струменевої установки [5] згодом було побудовано портативний вимірювач загальної концентрації атмосферного аерозолю [11]. Конструкцію цього останнього і було покладено в основу розробки потокового спектрометра атмосферного аерозолю.

### **Особливості будови спектрометра**

Спектрометр складається з шести основних функціональних блоків: 1) нагнітально-всмоктувального пристрою; 2) резервуара для досліджуваного аерозолю; 3) вхідного пристрою; 4) конденсаційного пристрою; 5) фотоелектричного лічильника крапель; 6) системи живлення.

Більшу частину цих пристроїв змонтовано на спільній металевій рамі **1** (рис. 1), яка об'єднує їх у єдину жорстку конструкцію.

Нагнітально-всмоктувальний пристрій (рис. 2) складається з помпи **1**, що живиться від керованого автотрансформатора (на рисунку не показано), триходових кранів-перемикачів **2** та **6**, регулювального вентиля **3**, аерозольного фільтра **4**, реометра **5** (поз. **45** на рис. 1), запірною крана **10**. У режимі всмоктування крізь кран **10** відбувається відбирання аерозольної проби в резервуар **7** з використанням штуцерів **8** і **9** (відповідні позиції на рис. 1: **28**, **27** і **29**). Після закриття крана **10** пристрій перемиканням кранів **2** і **6** переводиться у режим нагнітання, коли проба аерозолю з резервуара **7** витискується крізь капіляр **30** тонким струменем у вхідний пристрій **11** (**25**), де цей струмінь огортається циліндричним шаром профільтованого повітря, пропущеного через зволожувач **12** і штуцер **13** (**23**). Крізь інший штуцер **14** (**31**) з резервуара **16** подається дистильована вода для зволоження пористого покриття внутрішніх стінок конденсаційної камери. подача води регулюється краном **15**. Потік нагнічуваного повітря, очищеного батареєю фільтрів В-0,05 ФПП-1,5-4,5, розподіляється таким чином, що у резервуар **7** спрямовується 2% його загальної витрати, а у зволожувач **12** і далі у вхідний пристрій **11** решта — 98%.

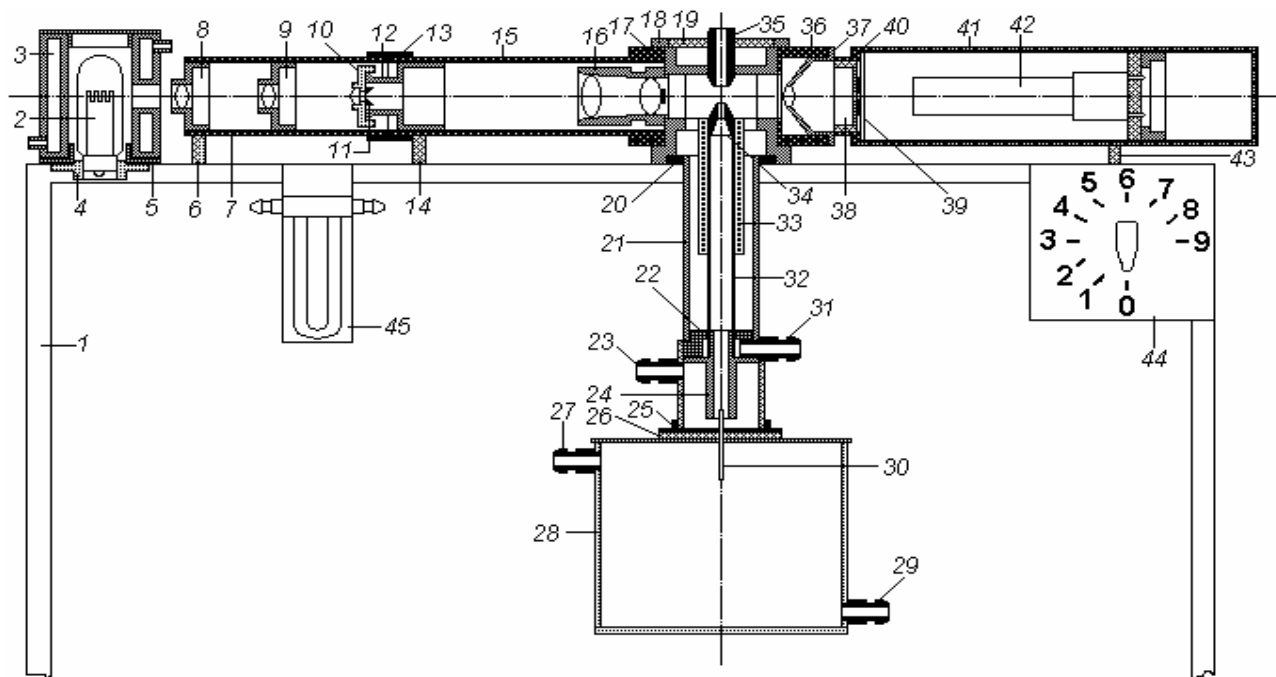


Рис. 1. Схема будови спектрометра атмосферного аерозолю: 1 – станина, 2 – джерело світла (лампа розжарювання), 3 – кожух лампи з водяним охолодженням, 4 – патрон із системою юстирування, 5 – фланець кріплення кожуха лампи, 6, 14, 43 – кріпильні стійки, 7 – тубус освітлювача, 8, 9 – конденсорні лінзи в ковзних оправах, 10 – антивіньєтивна лінза, 11 – щілинна діафрагма, 12 – центрувальна оправа, 13 – сполучний хомут, 15 – допоміжний тубус, 16 – об’єктив з непрозорим центральним екраном, 17 – перехідна втулка, 18 – корпус вимірювальної камери, 19 – кришка вимірювальної камери, 20 – перехідний фланець, 21 – захисний кожух конденсаційної камери, 22 – корпус вхідного пристрою, 23, 27, 29 – штуцери подачі повітря, 24 – вхідний патрубок, 25 – фланець, 26 – прокладка, 28 – резервуар для аерозольної проби, 30 – капіляр, 31 – штуцер подачі дистильованої води, 32 – потокова камера, 33 – електронагрівник, 34 – конічна насадка, 35 – вихідний патрубок, 36 – фігурний фланець, 37 – оправа приймальної лінзи, 38 – рухома оправа польової діафрагми 39, 40 – фланець, 41 – кожух, 42 – фотопомножувач, 44 – перемикач атенюатора, 45 – реометр

Резервуар для досліджуваного аерозолю **28** (див. рис. 1) виготовлено із листового металу у вигляді циліндра діаметром 113 мм і 100 мм заввишки, внутрішній об’єм його 1 дм<sup>3</sup>. За допомогою фланця **25** з прокладкою **26** він герметично під’єднується до вхідного пристрою, що складається з капіляра **30** діаметром 1 мм і 20 мм завдовжки, коаксіального патрубка **24** та циліндричної камери **22** зі штуцерами **23** і **31**. Розміри камери: висота 50 мм, діаметр 30 мм.

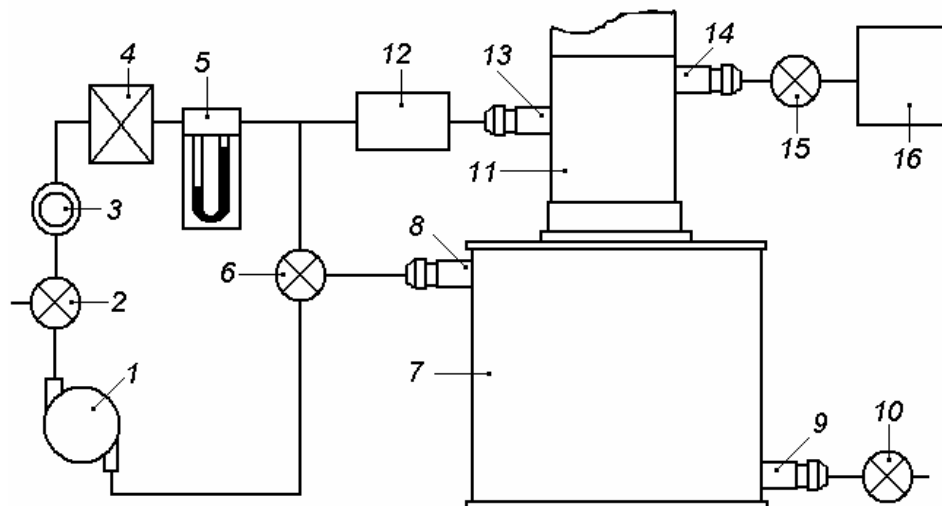


Рис. 2. Схема будови пробовідбірної системи спектрометра: 1 – повітряна помпа, 2, 6 – триходові крани-перемикачі, 3 – регулювальний вентиль, 4 – батарея аерозольних фільтрів, 5 – реометр, 7 – повітряний резервуар, 8, 9, 13, 14 – під'єднувальні штуцери, 10 – запірний кран, 11 – вхідний пристрій, 12 – зволожувач, 15 – регулювальний кран, 16 – резервуар із дистильованою водою

Основним елементом конденсаційного пристрою є потокова камера **32** – латунний циліндр завдовжки 200 мм з внутрішнім діаметром 12 мм і зовнішнім – 14 мм. Нижній кінець циліндра герметично з'єднується з патрубком **24**, а у верхній його кінець запресовано конічну насадку **34** з діаметром вихідного отвору 2 мм. Потоківу камеру розташовано по осі виготовленого з дюралюмінію циліндричного кожуха **21**, який щільно насаджено на проточку вхідної камери **22**, а за допомогою фланця **20** жорстко приєднано до корпусу вимірювальної камери **18** фотоелектричного лічильника. На зовнішній поверхні потокової камери змонтовано циліндричний електронагрівник **33** потужністю до 5 Вт, що живиться від зовнішнього джерела постійним стабілізованим струмом через атенюатор **44**. Внутрішню її поверхню вистилає шар гідрофільного пористого матеріалу товщиною 0,8 мм, який під час роботи постійно зволожується дистильованою водою.

Фотоелектричний лічильник складається з чотирьох основних вузлів: джерела світла (2-5), освітлювальної оптичної системи (7-16), вимірювальної камери (17-20, 35, 36), збиральної оптичної системи (37-39) та фотоелектричного перетворювача (40-42).

Джерелом світла є лампа розжарювання **2** типу К-400, закріплена на ностирувальному фланці **4** і за допомогою монтажного фланця **5**

розташована всередині кожуха водяного охолодження **3**. Через систему лінз **8, 9** та **10** лампа рівномірно освітлює оптичну щілину **11**. Об'єктив **16** формує утрічі зменшене зображення щілини **11** у вимірювальній камері між насадкою **34** і вихідним патрубком **35**. Центральна частина об'єктива **16** перекрита непрозорим круглим екраном, в геометричній тіні якого розташована лінза збиральної оптичної системи **37**, що переносить зображення оптичної щілини **11** у площину польової діафрагми **39**. За наявності у світловому промені аерозольних частинок, що проходять з конічної насадки **34** до патрубка **35**, частина розсіяного ними світла потрапляє на катод фотопомножувача **42** (типу ФЭУ-64). Розміри лічильного об'єму визначаються товщиною плоского світлового променя у проміжку між насадкою **34** і патрубком **35** та діаметром аерозольного струменя у вимірювальній камері (рис. 3).

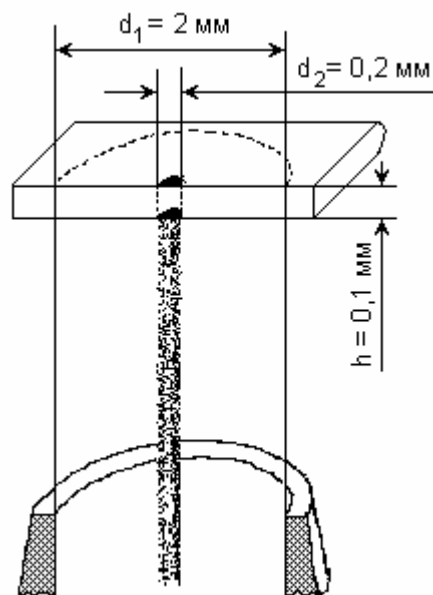


Рис. 3. До визначення чутливого об'єму спектрометра:  $d_1$  – діаметр потоку,  $d_2$  – діаметр аерозольного струменя,  $h$  – товщина світлового променя

Електронагрівник **33** сконструйовано таким чином, щоб температура поверхні потокової камери збільшувалася у напрямку руху потоку. Відповідний температурний градієнт установлюється і в шарі змоченого пористого матеріалу, яким покрита внутрішня поверхня камери. Коефіцієнт дифузії водяної пари у повітрі більший від коефіцієнта теплопровідності повітря, тому зволоження потоку у камері **32** в умовах ламінарного режиму відбувається швидше, ніж його нагрівання. Як наслідок, всередині камери виникає зона пересичення, де парціальний тиск водяної пари перевищує тиск її насичення. На рис. 4

наведено просторовий розподіл пересичення в камері, розрахований за методом, запропонованим Г.Н.Ліпатовим та Г.Л.Шингарьовим [8]. Цей розподіл має три особливості. По-перше, у будь-якому поперечному перерізі, окрім незначної ділянки на вході, пересичення зростає у напрямку від стінок камери до її осі.

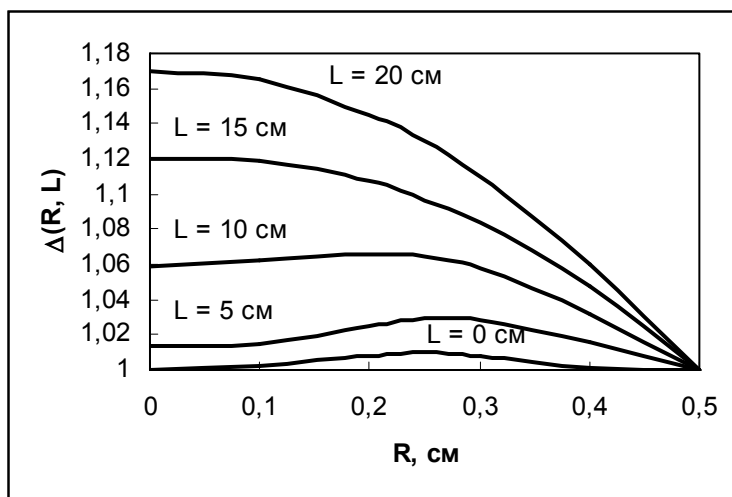


Рис. 4. Просторовий розподіл пересичення  $\Delta$  в потоковій камері.  $R$  – радіальна відстань від осі камери,  $L$  – відстань поперечного перерізу від входу в камеру

По-друге, пересичення монотонно зростає у напрямку градієнта температури. По-третє, навколо осі існує циліндрична зона, в якій пересичення практично не змінюється вздовж радіуса. Оскільки струмінь досліджуваного аерозолю повністю перебуває в цій зоні, можна вважати, що за умов незмінної швидкості потоку поздовжній профіль пересичення визначається лише перепадом температури між початком і кінцем конденсаційної камери (тобто різницею температур вхідного патрубку  $t_1$  і конічну насадку  $t_2$ :  $\Delta t = t_2 - t_1$ ).

За допомогою перемикача атенюатора **44** (рис. 1), який забезпечує ступеневу зміну струму живлення нагрівача, в потоковій камері можна задавати дев'ять термодинамічних режимів. Для кожного з них пересичення має бути точно заданим і надійно відновлюваним, а ступінь укрупнення частинок — достатнім, щоб їх можна було зареєструвати фотоелектричним датчиком. Для цього необхідно, щоб профіль пересичення вздовж осі камери швидко досягав максимуму, а потім спадав досить повільно, закінчуючись у конічній насадці **34**. Такий профіль можна реалізувати в умовах ламінарності відповідним заданням градієнта температури в нагрівачі **33** і швидкості потоку.



## Визначення експлуатаційних характеристик спектрометра

Гідродинамічну характеристику потокової камери було визначено методом візуального спостереження струменя тютюнового диму за допомогою довгофокусного мікроскопа [5]. При зміні швидкості потоку від 2 до 12 см<sup>3</sup>/с і сили струму нагрівача від 0 до 0,7 А струмінь не турбулізується, зберігає циліндричну форму і лише після виходу із насадки його діаметр дещо збільшується від 170 до 220 мкм. Оптимальну об'ємну швидкість потоку на рівні 5,3 см<sup>3</sup>/с було обрано за результатами стабільності значень частоти слідування і спектра амплітуд фотоелектричних імпульсів, отриманих на виході лічильника у разі подачі в потокову камеру тестового аерозолі з відомими характеристиками (застосовували конденсаційний аерозоль йодиду срібла, спектр радіусів частинок якого визначений за допомогою електронного мікроскопа, охоплював від 0,02 до 0,16 мкм). Цей самий аерозоль було використано як для оцінки максимального пересичення, що реалізується у потоковій камері, так і для градуювання атенюатора (табл. 1).

Таблиця 1

Градуювання атенюатора

Положення перемикача атенюатора	Перепад температури, °С	Значення пересичення	Кельвінівський радіус частинок аерозолі, мкм
0	0	1,000	–
1	0,1	1,001	0,27
2	0,7	1,002	0,22
3	1,4	1,004	0,18
4	2,5	1,008	0,13
5	4,6	1,017	0,08
6	7,0	1,030	0,05
7	11,0	1,041	0,03
8	15,0	1,055	0,02
9	19,4	1,073	0,014

Безпосередніми вимірюваннями було встановлено, що за умов оптимальної об'ємної швидкості потоку (5,3 см<sup>3</sup>/с) лічильний об'єм спектрометра складає  $3,14 \cdot 10^{-6}$  см<sup>3</sup> (діаметр струменя аерозолі 200 мкм, товщина променя 100 мкм).

Пристаєований у спектрометрі фотоелектричний датчик має високу чутливість, притаманну приладам, що базуються на вимірюванні інтенсивності світла, розсіяного вперед (так звані датчики – 0°), але його

градувальна крива (рис. 5) містить області неоднозначності, де одному значенню амплітуди імпульсу відповідає три значення радіуса краплі. Таких областей дві: в інтервалі радіусів 0,4÷1,1 мкм та 1,3÷2,0 мкм. Хоча це вносить певні незручності в процес вимірювання, згаданий недолік можна обійти шляхом спеціальної математичної обробки гістограми зареєстрованих імпульсів [2]. Для цього лише потрібно, щоб мінімальний радіус крапель, що реєструються лічильником, був менший за 0,4 мкм. Спеціально проведеними дослідженнями було показано, що така умова виконується.

Оскільки проба аерозолі в процесі вимірювання певний час перебуває у резервуарі обмеженого об'єму, необхідно враховувати, як саме на результати визначення концентрації впливають седиментація, коагуляція та дифузія аерозольних частинок до стінок резервуара.

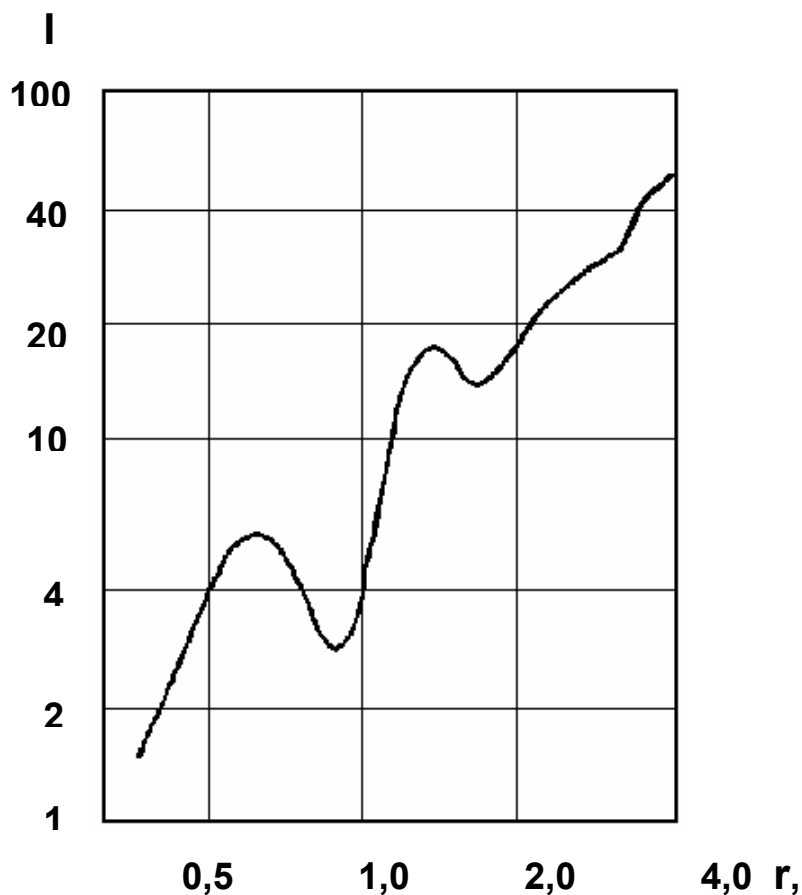


Рис. 5. Залежність амплітуди фотоелектричних імпульсів  $I$  (довільні одиниці) від радіуса крапель водяного аерозолі

На рис. 6 наведено результати дослідів з кімнатним аерозолем при максимально можливому пересиченні у потоковій камері (перемикач атенюатора в положенні 9).

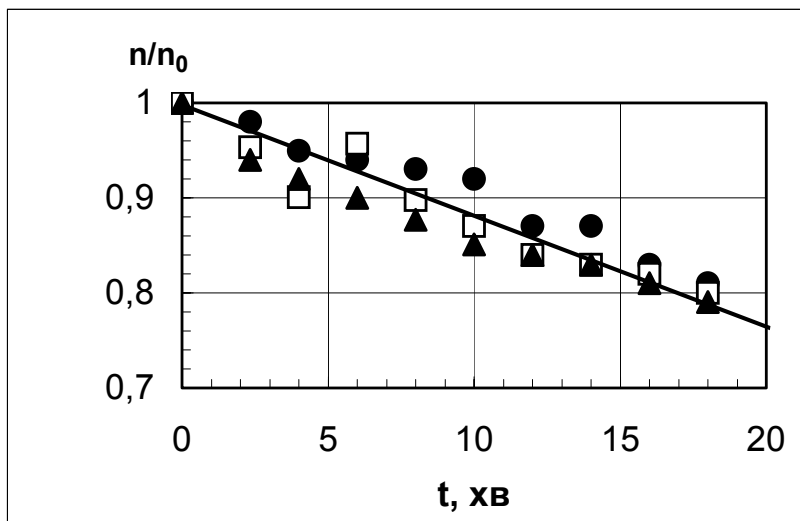


Рис. 6. Залежність відносної концентрації частинок кімнатного аерозолі від часу перебування проби у резервуарі (дані трьох дослідів)

По осі ординат відкладено значення відносної концентрації  $n/n_0$  у відсотках, а по осі абсцис — час  $\tau$  у хвилинах. Спостереження показали, що початкова концентрація впродовж 20 хв. лінійно спадає на 20%. Беручи до уваги, що кімнатний аерозоль складається переважно із частинок субмікронного розміру з загальною концентрацією не вище  $10^4 \text{ см}^{-3}$ , впливом седиментації та коагуляції можна знехтувати, тому основною причиною такого зменшення концентрації залишається втрата високодисперсних частинок внаслідок їх дифузійного дрейфу до стінок резервуара. Оскільки коефіцієнт броунівської дифузії частинок обернено пропорційний їхньому радіусу, досліджуваний аерозоль втрачає в першу чергу найдрібніші частинки, тому вимірювання спектру слід розпочинати саме з них, тобто за максимального пересичення у потоковій камері, поступово переходячи на нижчі рівні пересичення за допомогою ступеневого атенюатора.

На рис. 7 наведено результати визначення спектра розмірів частинок кімнатного аерозолі в залежності від часу перебування проби в резервуарі: 1 – 20 хв, 2 – 2 год 30 хв, 3 – 24 год.

Протягом доби загальна концентрація падає на два порядки, а спектр дещо зсувається у бік більших розмірів.

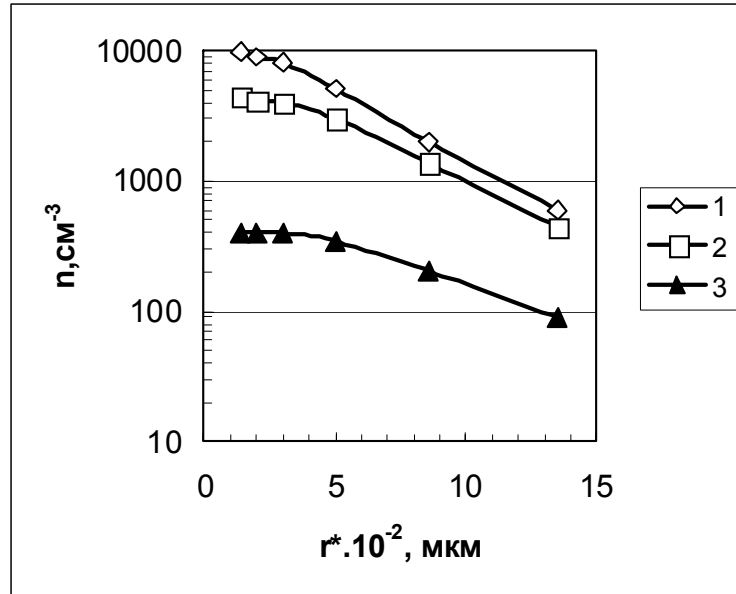


Рис. 7. Залежність кумулятивної концентрації частинок кімнатного аерозолю різного розміру від часу перебування проби у резервуарі: 1 – через 20 хв, 2 – через 2 год 30 хв, 3 – через добу

### Визначення спектра розмірів частинок атмосферного аерозолю

У рамках випробування працездатності приладу було проведено низку досліджень природного атмосферного аерозолю за різних метеорологічних ситуацій. Відбір проб здійснювали, пропускаючи через резервуар приладу (об'ємом 1 л) не менше 10 л атмосферного повітря. Отримані результати наведено на рис. 8, де залежність кумулятивної концентрації  $n$  від кельвінівського радіуса  $r^*$  подається у подвійному логарифмічному масштабі.

Крива **1** відповідає випадку, коли у повітрі за відсутності вітру висів дим від спалюваного листя. Крива **2** отримана звичайного осіннього дня з помірною хмарністю, крива **3** – за дощової погоди, крива **4** – під час ранкового туману. Можна зауважити, що за наявності диму значно збільшується концентрація частинок в усьому діапазоні розмірів, порівняно з прийнятою за норму кривою **2**. Дощ і туман істотно знижують концентрацію атмосферного аерозолю, причому туман особливо впливає на високодисперсну фракцію.

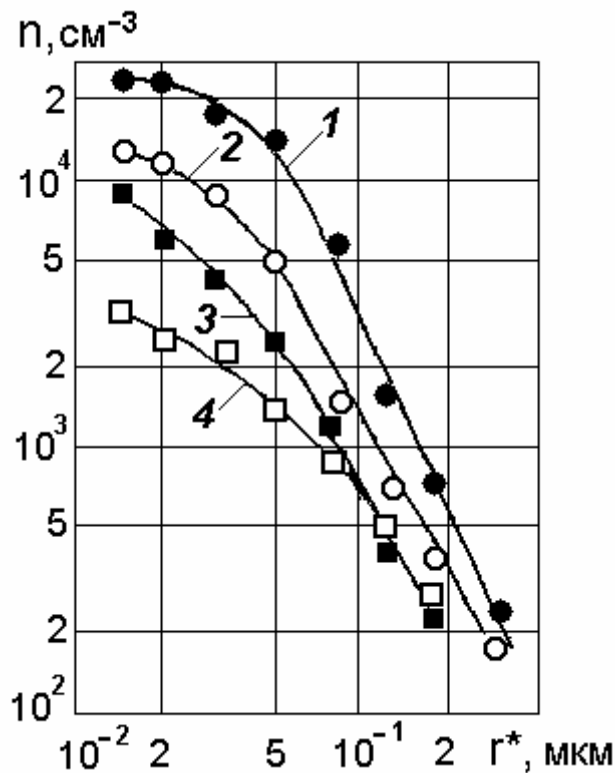


Рис. 8. Залежність концентрації і спектра розмірів атмосферного аерозолю від метеорологічних умов: 1 – задимлене повітря, 2 – помірна хмарність, 3 – дощова погода, 4 – туман

### Висновки

Створено діючий макет потокового аерозольного спектрометра, в якому поєднується метод конденсаційного укрупнення дрібних аерозольних частинок з високочутливим фотоелектричним лічильником крапель. Конденсаційна камера спектрометра забезпечує діапазон пересичень водяної пари від 0 до 1,073 з розбиванням на 9 градацій. Відповідне градування дає можливість безпосередньо перетворювати розподіл аерозольних частинок за пересиченням у спектр розмірів (в діапазоні радіусів 0,14 до 10 мкм). Випробування виявили достатню чутливість приладу до зміни параметрів тестового і природного аерозолів.

\* \*

*Рассмотрено конструкцию, принцип действия и характеристики поточного конденсационного фотоэлектрического измерителя спектра размеров и концентрации частиц субмикронных аэрозолей.*

\* \*

1. Баханова Р.А., Иванченко Л.В. О неоднозначности определения размеров капель с помощью фотоэлектрического счетчика // Тр. УкрНИГМИ. – 1971. – Вып. 99. – С. 87-92.

2. *Баханова Р.А., Иванченко Л.В.* О возможности использования фотоэлектрического счетчика в области неоднозначной зависимости размера капли от амплитуды импульса // *Тр. УкрНИГМИ.* – 1972. – Вып. 114. – С. 69-73.
3. *Баханова Р.А., Силаев А.В.* Исследование роста капель на пассивированных ядрах конденсации при относительной влажности, меньшей 100% // *Тр. УкрНИГМИ.* – 1971. – Вып. 103. – С. 126-136.
4. *Иванченко Л.В.* Определение коэффициента конденсации при росте капель на гигроскопич. частицах // *Тр. УкрНИГМИ.* – 1977. – Вып. 156. – С. 58-63.
5. *Иванченко Л.В.* Установка для определения концентрации высокодисперсных аэрозолей // *Тр. УкрНИГМИ.* – 1989. – Вып. 230. – С. 59-66.
6. *Контуш С.М.* Струйный метод измерения дисперсности гигроскопических дымов // *Коллоидный журн.* – 1965. – 27, № 4. – С. 534-539.
7. *Лактионов А.Г.* О связи конденсационной активности облачных ядер конденсации с их размерами // *Физика атмосферы и океана.* – 1967. – 3, № 1. – С. 25-33.
8. *Липатов Г.Н., Шингарев Г.Л.* Метод создания стационарных контролируемых пересыщений для исследования конденсационных процессов // *Тез. докл. 15 Всесоюзн. конф. по динамике разреженных газов.* – Свердловск, 1987. – Т. 2. – С. 25.
9. *Мейсон Б.Дж.* Физика облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 542 с.
10. *Петренчук О.П.* Экспериментальные исследования атмосферного аэрозоля. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 264 с.
11. Проблеми фізики хмар і активних впливів на метеорологічні процеси / Ред. *А.В.Силаєв.* – К.: Наук. думка, 2004. – 351 с.
12. *Седунов Ю.С.* Физика образования жидкокапельной фазы в атмосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 207 с.
13. *Сторожилова А.И.* Дифференциальный счетчик ядер конденсации // *Исследования в области поверхностных сил.* – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – С. 209-211.
14. *Agarval G.K., Sem G.J.* Continuous flow, single-particle-counting condensation nucleus counter // *J. Aerosol Sci.* – 1980. – 11, N 4. – P. 343-357.
15. *Hodkinson J., Greenfield F.* Responce calculations for light scattering counters and photometers // *Appl. Optics.* – 1965. – 4, N 11. – P. 1463-1474.
16. *Niessner R., Helsper C., Rönicke G.* Application of a multistep condensation nucleus counter as a detector for particle surface composition // *Proc. First Intern. Aerosol Conf.* – N.Y., Amsterrdam, Oxford: Elsevier, 1984. – P. 63-66.
17. *Sinclair D., Hoopes G.S.* A continuous flow condensation nucleus counter // *J. Aerosol Sci.* – 1975. – 6, N 1. – P. 1-7.

*Український науково-дослідний  
гідрометеорологічний інститут, Київ*