

МЕТОДИ І ЗАСОБИ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

УДК 551.508.91

Б.О. Іванов, Л.В. Іванченко, В.Б. Осіс, Л.М. Товстенко

ДЮЧИЙ МАКЕТ КОМПЛЕКСНОГО НЕФЕЛОМЕТРИЧНОГО ВИМІРЮВАЧА МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Розглянуто експериментальні дослідження, проведені на створеному макеті нефелометричного датчика. Наведено оптичні характеристики часток атмосферних опадів і доведено здатність нефелометричного методу до вимірювання їхньої інтенсивності.

Нефелометричний метод базується на відомому явищі розсіяння світла в мутному середовищі. Він широко використовується для вимірювання параметрів аеродисперсних систем у лабораторних експериментах, виробничих процесах та атмосферному середовищі. Останнім часом нефелометричні прилади все частіше залучаються до вимірювання метеорологічної оптичної дальності видимості (МОД) на злітно-посадкових смугах аеропортів високих категорій. Зокрема, з 2006 року в кількох аеропортах України впроваджуються вимірювачі видимості ВВ-1, сконструйовані і виготовлені АТ “Міррад”.

Як відомо, нефелометричні вимірювачі МОД чітко реєструють погіршення видимості, коли є опади. Отже, сформовані вимірювачем фотоелектричні сигнали містять інформацію про параметри мікроструктури опадів. З огляду на це Фінська фірма “Вайсала” розробила і впровадила в міжнародну практику так званий датчик погоди FD12P, який дає змогу визначать інтенсивність і вид опадів у широкому діапазоні температур. Винятком є інтервал від мінус 3 до 3°C (найбільш небезпечний для дорожнього транспорту), де FD12P визначає лише інтенсивність опадів за допомогою ємнісного вимірювача і не відрізняє дощ від мокрого снігу чи снігу.

Мета даної роботи – спроба на базі нефелометричного вимірювача видимості ВВ-1 створити вітчизняний датчик погоди, спроможний визначати не тільки МОД та інтенсивність опадів, а й ідентифікувати такі

природні явища, як серпанок, туман, імла, дощ, мокрий сніг, сніг, крупа, град.

Фізичні властивості опадів

З опублікованих результатів дослідження мікроструктури атмосферних опадів відомо, що спектри розмірів крапель у дощах мають діапазон від $\sim 0,1$ мм до 3 мм. [1]. Менші краплі перебувають практично в завислому стані, тобто не впливають на характеристики дощу. Крупніші краплі, падаючи зі швидкістю ~ 10 м/с, розпадаються на кілька крапель відповідно менших розмірів унаслідок взаємодії з повітрям. Вважається, що всі краплі мають сферичну форму. Концентрація крапель рідко перевищує $5 \cdot 10^3 \text{ м}^{-3}$ [2]. Отже, у середньому на одну краплю припадає приблизно 200 см^3 атмосферного середовища.

На відміну від дощів частки снігопадів характеризуються значною різноманітністю їх форми й будови [1]. Поодинокі сніжинки – це в основному пластинки переважно гексагональної форми, розміри яких досягають 7 мм [2]. Комплекси сніжинок можуть досягати значно більших розмірів, а за формою вони являють собою об'ємні утворення, які можна характеризувати певним поперечним перерізом. Густина комплексів сніжинок значно менша від густини кристалічного льоду. Швидкість падіння сніжинок у середньому становить ~ 1 м/с [2]. Концентрація часток у снігопадах не перевищує $\sim 10^3 \text{ м}^{-3}$.

Світловий потік, проходячи через атмосферне середовище, послаблюється в результаті дії механізмів розсіяння й поглинання світла наявними там частинками [3]. В опадах поглинання світла практично немає, так що ослаблення світла відбувається фактично лише внаслідок його розсіяння. Тобто коефіцієнт ослаблення світла (α) в опадах дорівнює коефіцієнту розсіяння (β). Зв'язок коефіцієнта ослаблення (α) і інтенсивності опадів (1) неодноразово досліджувався в багатьох польових роботах [2]. На рис. 1 і 2 показано результати таких досліджень. На осях ординат відкладено значення $\alpha \text{ км}^{-1}$, на осях абсцис – значення I мм/год. На рис. 1 точками показано відповідні значення α і I , розраховано з попередньо визначених експериментально параметрів мікроструктури дощів [2]. Значення α розраховано за формулою:

$$\alpha = \pi \sum r_i^2 N_i Q_i, \quad (1)$$

де r_i – радіус краплі i -ї фракції; N_i – їхня концентрація; Q_i – фактор ефективності ослаблення.

Щоб розрахувати інтенсивність опадів, використали формулу:

$$I = 4\pi/3 \sum r_i^3 n_i, \quad (2)$$

де n_i – число крапель i -ї фракції в пробі.

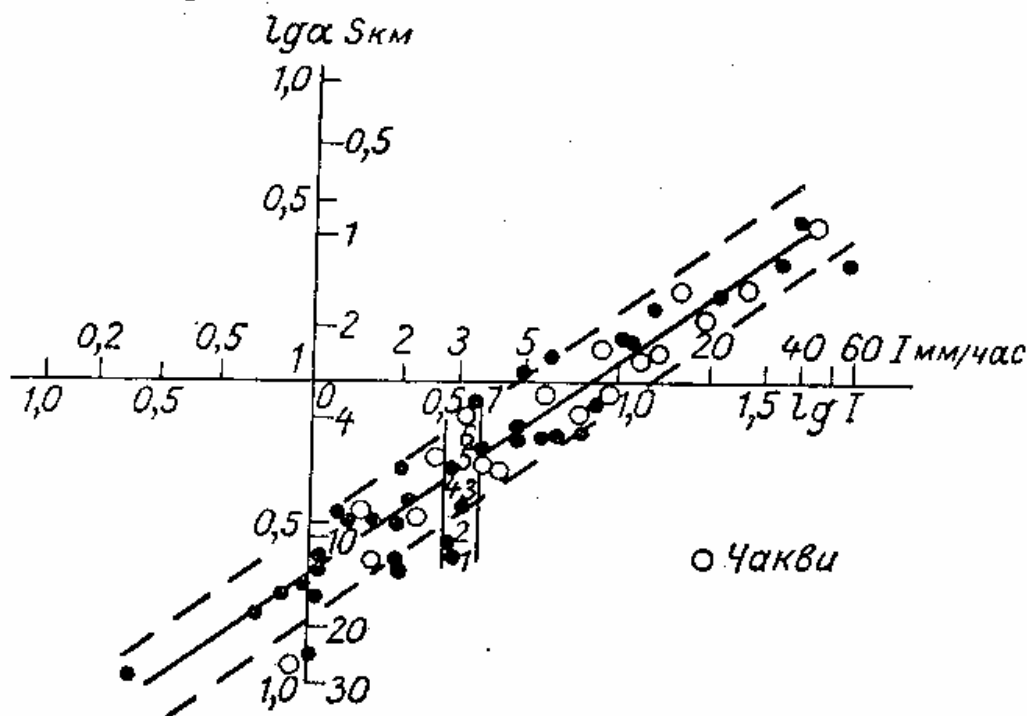


Рис. 1. Залежність коефіцієнта ослаблення від інтенсивності дощу

Як видно з рис. 1, між $\lg \alpha$ та $\lg I$ є лінійна кореляційна залежність. Причому коефіцієнт кореляції дорівнює 0,95. Проте максимальні відхилення значень α та I від середніх становлять 70-80 %. Оскільки наведені значення α та I не містять інструментальних похибок їх вимірювань, то слід визнати, що наведений зв'язок між α та I є природною властивістю дощів. Тобто, те чи інше значення α (або I) може відповідати кільком значенням I (або α).

Аналогічний вигляд має зв'язок α та I для снігопадів, показаний на рис. 2. Тут наведені значення, отримані шляхом їх безпосереднього вимірювання в польових умовах. Тому відхилення від середніх значень ще більш значні, а коефіцієнт кореляції становить 0,91.

Таким чином, шляхом визначання коефіцієнта ослаблення (α) чи коефіцієнта розсіяння (β) в опадах не можна отримати достатньо точних даних про інтенсивність опадів. Тобто безпосереднє застосування

нефелометричних вимірювачів МОД для визначання інтенсивності опадів не доцільне.

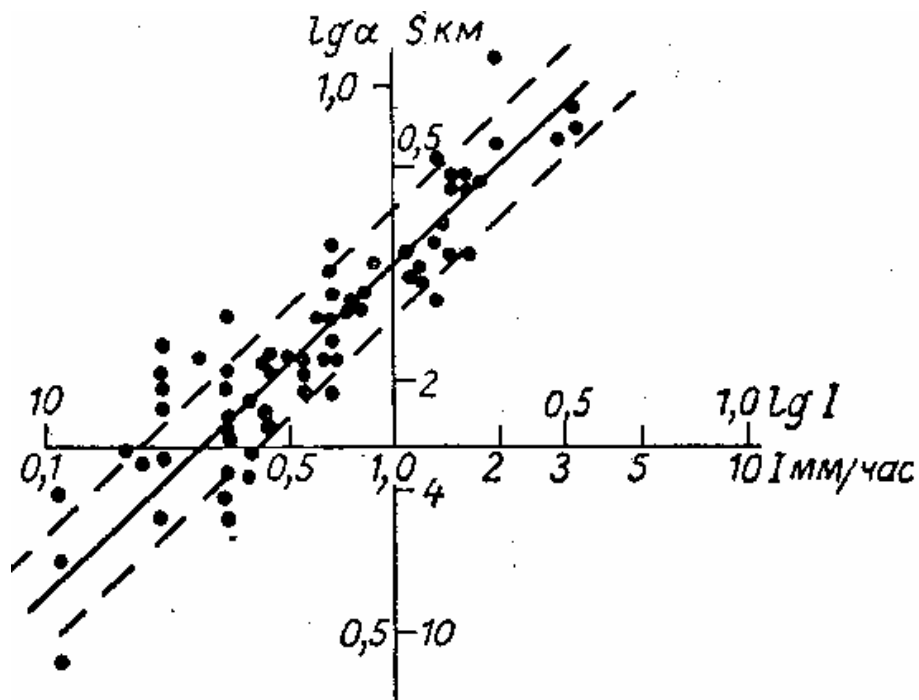


Рис. 2. Залежність коефіцієнта ослаблення від інтенсивності снігопаду

Проте достатньо незначна концентрація часток атмосферних опадів надає можливість використовувати нефелометричні вимірювачі в режимі фотоелектричного спектрометра, тобто в режимі вимірювання розмірів поодиноких часток і їх концентрації в середовищі.

Оптичні характеристики вимірювача видимості ВВ-1

Для оцінки здатності нефелометричного вимірювача видимості працювати в режимі фотоелектричного спектрометра часток опадів проведено дослідження характеристик вимірювача ВВ-1. У загальному плані вимірювач складається з двох основних частин (рис. 3): випромінювача (1), приймача (3).

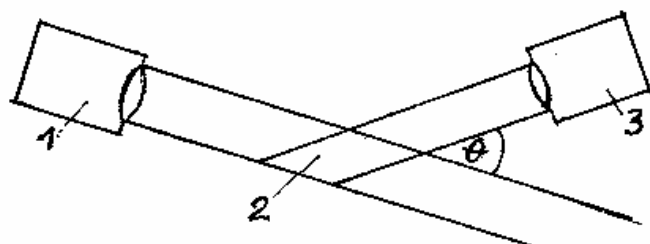


Рис. 3. Схема вимірювача ВВ-1: 1 – випромінювач; 2 – чутливий об'єм; 3 – приймач

Оптична система приймача уловлює промені, розсіяні в межах чутливого об'єму 2. Останній формується обома оптичними системами в зоні перетину їх оптичних осей.

h, см	4	4	3	4	3	3	3	3	2	3	3	3	3	4	5
12	10	10	8	6	6	5	5	6	5	6	10	15	15	15	13
10	7	23	96	137	115	79	55	72	111	135	110	87	47	13	5
8	6	7	20	80	1067	1953	2396	1952	921	403	135	54	15	6	4
6	6	8	16	42	216	643	1157	2118	1521	489	130	38	6	4	4
4	7	9	19	20	41	77	65	46	82	67	21	14	12	7	4
2	4	7	8	9	7	6	5	7	5	5	4	6	7	7	8
0	4	4	4	4	3	4	4	3	3	3	3	3	3	4	4
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	l, см

Рис. 4. Розподіл освітленості зони чутливого об'єму вимірювача видимості ВВ-1

На рис. 4 показано результати обстеження освітленості зони чутливого об'єму ВВ-1. Наведені на рисунку числа відповідають сформованим ВВ-1 рівням сигналів у мВ від зонда у вигляді сферичної кульки з пінопласту діаметром ~ 3 мм. Координати зонда (h, l) лежать у вертикальній площині, яка містить оптичні осі вимірювача і приймача. У такому разі геометричний центр чутливого об'єму має координати: $h = 7$ см, $l = 15$ см.

Як видно з рисунка, чутливий об'єм вимірювача ВВ-1 освітлений нерівномірно: освітленість зменшується від центра до периферії. З геометричних міркувань чутливий об'єм дорівнює ~ 70 см³, тоді як за рівнем освітленості фактична чутлива зона займає об'єм ~ 150 см³. Середнє значення об'єму повітря, що припадає на одну частку опадів, більше за 200 см³. Отже, як правило, у будь-який момент у чутливому об'ємі ВВ-1 може перебувати лише одна частка опадів.

Таким чином, за розмірами фактичного чутливого об'єму вимірювач видимості ВВ-1 здатен працювати в режимі реєстрації поодиноких часток опадів.

Щоб оцінити діапазон розмірів поодиноких часток, які реєструє ВВ-1, скористаємося його паспортними даними для вимірюваних МОД: діапазон МОД становить 0,02-50 км. За формулою Кошмідера ($\text{МОД} = 3/\alpha$) відповідний діапазон значень коефіцієнта ослаблення α дорівнює 150-

$0,06 \text{ км}^{-1}$. Як відомо, для опадів $\alpha = \beta$ – коефіцієнта розсіювання. Отже, і діапазон значень β дорівнює $150-0,06 \text{ км}^{-1}$. Припустимо, що частки опадів монодисперсні. Тоді для β справедлива формула:

$$\beta = \pi r^2 N q, \quad (3)$$

де q – фактор ефективності розсіювання світла часткою радіуса r .

У разі реєстрації поодиноких часток їх концентрацію (N) оцінюють за формулою:

$$N = 1/3V, \quad (4)$$

де V – чутливий об'єм.

Для ВВ-1 $V \approx 150 \text{ см}^3$. Використавши формули (3) і (4), отримаємо: $r_{\min} \approx 70 \text{ мкм}$, а $r_{\max} \approx 3 \text{ мм}$. Отримані дані показують: вимірювач видимості ВВ-1 придатний для реєстрації часток в опадах, що найчастіше трапляються в природі.

Проте безпосереднє використання ВВ-1 для вимірювання інтенсивності опадів ускладнюється кількома обставинами. По-перше, освітленість його чутливого об'єму нерівномірна; по-друге, фотоелектричний сигнал від часток снігу залежить від їх орієнтації; по-третє, густина сніжинок мінлива; по-четверте, вимірювач ВВ-1 не має можливості розрізнити краплі і кристалічні частки.

Будова макета датчика

Щоб точніше визначити умови, необхідні для використання нефелометричного методу як засобу вимірювання інтенсивності опадів, побудовано діючий макет нефелометричного датчика. У процесі його побудови особливу увагу приділяли створенню оптичних систем освітлювача і приймача.

Освітлювач (рис. 5) складається із джерела світла (1); поляроїда (2), який у разі потреби можна знімати; збиральної лінзи (3) з фокусною відстанню $\sim 50 \text{ см}$ і світлової пастки (7). Лінза (3) спрямовує в пастку (7) пучок практично паралельних променів від джерела (1). До складу приймача входять: високоякісний фотооб'єктив (8), поляроїд (8'), діафрагма (9), фотопомножувач (10) та осцилограф (11). Оптична система приймача (8,8',9) спрямована на світлову пастку (5).

Діафрагма (9) з діаметром 1 мм розміщена у фокальній площині об'єктива (8).

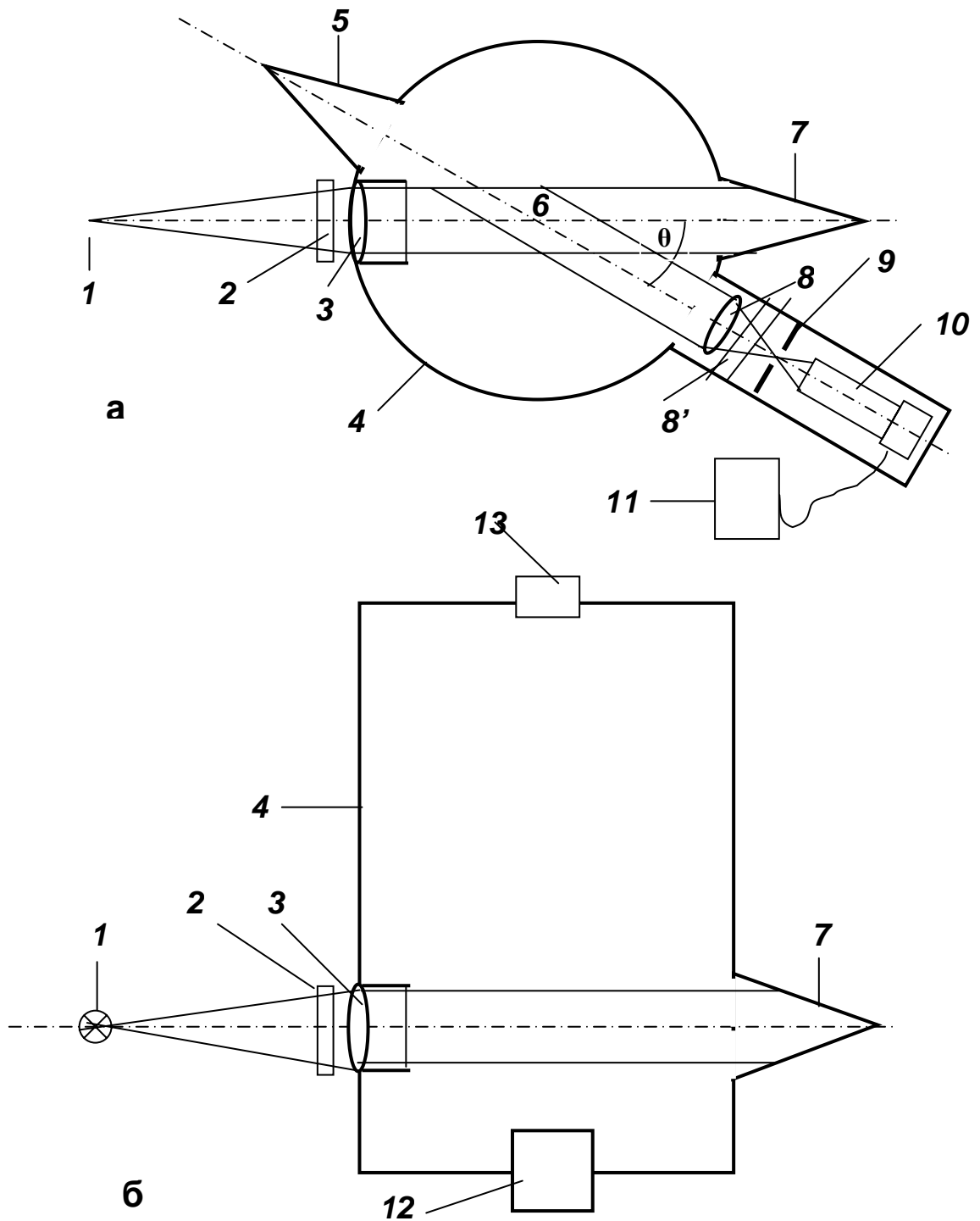


Рис. 5. Схема макета датчика та його розміщення в камері штучного туману: 1 – джерело світла; 2 – поляроїд; 3 – збиральна лінза; 4 – камера штучного туману; 5 – світлова пастка; 6 – чутливий об’єм; 7 – світлова пастка; 8 – фотооб’єктив; 8’ – поляроїд; 9 – діафрагма; 10 – фотопомножувач; 11 – осцилограф; 12 – диспергатор; 13 – скидальний пристрій

Таким чином, на катод фотопомножувача (10) потрапляє практично лише пучок променів розсіяного світла, паралельних до оптичної осі

приймача. Осі оптичних систем освітлювача і приймача перетинаються в площині спостереження під кутом $\varnothing = 40^\circ$. Відкритий чутливий об'єм (6) формується оптичним способом. Опорні елементи датчика закріплені на стінках камери штучного туману (4) діаметром 50 см і висотою 1 м. У разі потреби туман у камері створює дисковий диспергатор води (12). Зверху на камері (4) змонтовано пристрій (13) для скидання крупних крапель і кристалів у чутливий об'єм (6).

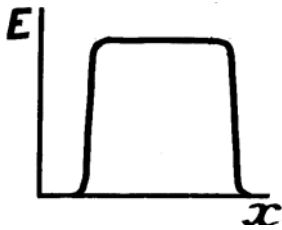


Рис. 6. Освітленість чутливого об'єму

На рис. 6 показано відносну освітленість світлового пучка вздовж діаметра, що проходить через центр чутливого об'єму (6). Як видно з рисунка, чутливий об'єм (6) має достатньо чітку геометричну форму. Мінливість його освітленості не перевищує 5%.

Експериментальні дослідження

Досліджували вплив штучного туману на формування макетом фотоелектричного сигналу від поодиноких крупних крапель води. Монодисперсні краплі води потрібного розміру створювали за допомогою пристрою (13) шляхом видавлювання води через капіляр відповідного діаметра. Розмір крапель визначали, зважуючи 50 крапель на аналітичних вагах. Експерименти проводили так. Заповнювали камеру (4) штучним туманом, включали генератор крупних крапель води (пристрій 13) і за допомогою осцилографа (11) спостерігали за зміною напруги на виході фотопомножувача (10), коли крупні краплі, вільно падаючи, проходили через чутливий об'єм (6).

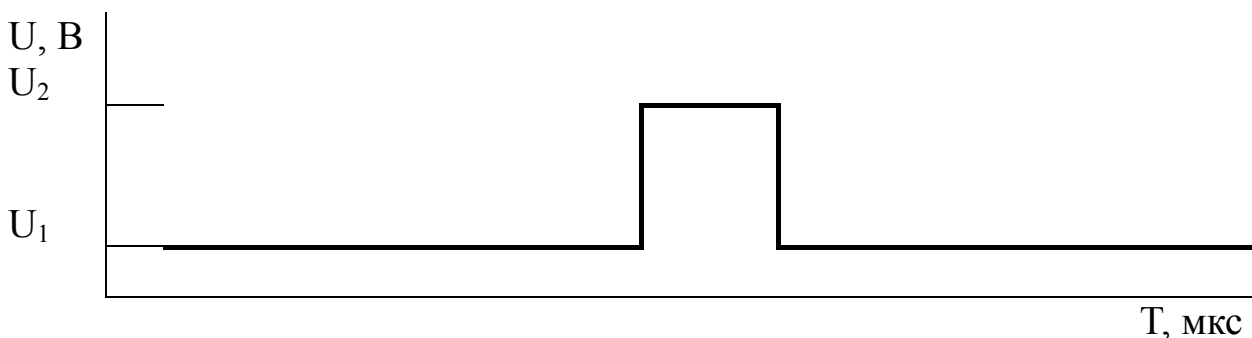


Рис. 7. Схематична осцилограма сигналу на виході макета датчика

На рис. 7 показано схематичну осцилограму електричного сигналу, що формується під час цього датчиком. По осі ординат відкладено рівень сигналу в довільних одиницях, по осі абсцис – час. Рівень сигналу U_1 відповідає мікроструктурі туману в чутливому об'ємі. Рівень сигналу U_2 зніщений крупною краплею води. Як видно з рисунка, датчик формує чіткий імпульс від краплі, амплітуда якого $\Delta U = U_2 - U_1$.

З плином часу рівень сигналу U_1 знижується через те, що зменшується густина туману в камері (4): краплі туману частково випаровуються, частково осідають на дно і стінки камери. Знижується при цьому і рівень сигналу U_2 . Але значення ΔU не змінюється, якщо не змінюється розмір крупних крапель води, генерованих пристроєм (13).

Аналогічні експерименти було проведено з краплями води з діаметрами 1,6; 2,3; 3,5 мм. З отриманих даних випливає, що значення ΔU пропорційне квадрату розміру крупної краплі, тобто площі її поперечного перерізу. Таким чином, створений макет нефелометричного датчика дає змогу визначити розмір поодиноких крупних крапель води, які падають у тумані.

На відміну від крапель фотоелектричний імпульс від часток снігопадів залежить не тільки від їхніх розмірів, а й від орієнтації в чутливому об'ємі. І в такому разі може йтися лише про відповідні середні величини навіть для монодисперсних часток.

За температур від мінус 3 до 3 °С опади бувають як у вигляді дощу чи снігу, так і у вигляді дощу зі снігом, так званого мокрого снігу. Щоб визначити фазовий стан часток опадів, у конструкції макета нефелометричного датчика передбачено можливість дискримінації сигналів від крапель. Для цього в оптичні системи освітлювача і приймача за потреби встановлюють два поляроїди (2) і (8'). Якщо їх площини поляризації взаємно перпендикулярні, то в такому випадку світло, розсіяне достатньо малими краплями, не проникає до фотопомножувача (10), і такі краплі не будуть зареєстровані. І навпаки, внаслідок ефекту деполіризації світлові сигнали від кристалів, більші за певний розмір, будуть зареєстровані датчиком. Під час експериментальних досліджень встановлено, що, коли використовують “схрещені” поляроїди (2) і (8'), макет не реєструє краплі менші за ~ 3 мм у діаметрі. Водночас, кристалики цукру, розмірами ~ 1 мм і більше, надійно реєструються.

Вимірювач видимості ВВ-1 у своєму складі має два ідентичні нефелометричні датчики (для надійності даних вимірювань). Один з них

без особливих зусиль може бути оснащений двома поляроїдами. У такому разі за інших достатніх умов ВВ-1 може бути трансформований у датчик погоди, здатний надавати інформацію про інтенсивність опадів за будь-яких температур.

Висновки

Проаналізувавши дані опублікованих робіт та експериментальних досліджень, отримали такі результати:

1. Нефелометричний метод може бути використаний як засіб для ідентифікації атмосферних опадів та визначення їх інтенсивності.

2. Побудовано діючий макет нефелометричного датчика, здатний визначати спектри розмірів дощових крапель і середні значення розмірів часток у снігопадах. Макет може працювати в режимі дискримінації крапель менших за ~ 3 мм.

3. Проаналізовано можливість трансформації вимірювача видимості ВВ-1 у комплексний нефелометричний вимірювач метеорологічних параметрів.

* *

Рассмотрены экспериментальные исследования, проведённые на разработанном макете нефелометрического датчика. Наведены оптические характеристики частиц атмосферных осадков и доведена возможность нефелометрического метода к измерению их интенсивности.

* *

1. *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 639 с.
2. *Батенева О.Д., Довгалло Е.Н., Полякова Е.А.* Экспериментальные исследования оптических свойств приземного слоя атмосферы // Тр. ГГО – 1967. – Вып. 220. – С. 66-100.
3. *Мак – Картни Э.* Оптика атмосферы. – М.: Мир, 1979. – 421 с.

*Український науково-дослідний
гідрометеорологічний інститут, Київ*