

МЕТОДИ І ЗАСОБИ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

УДК 551.508:543.275.1

Б.О.Іванов, В.Б.Осіс

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТОЕЛЕКТРОННОГО ДАТЧИКА МЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ДАЛЬНОСТІ ВИДИМОСТІ В ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ

Наведено результати експериментальних досліджень у лабораторних умовах основних метрологічних характеристик оптоелектронного датчика метеорологічної дальності видимості, який створений в ІФН НАНУ.

Ключові слова: дослідження, метрологія, дальність видимості, оптоелектронний датчик, нефелометр.

Створений в ІФН НАНУ датчик метеорологічної дальності видимості (далі – датчик) побудовано за схемою спрямованого нефелометра. До складу датчика входять три основних елементи:

- випромінювач, призначений для формування колімованого потоку випромінювання в досліджуваному атмосферному середовищі;
- приймач, за допомогою якого частина розсіяного середовищем випромінювання перетворюється на придатну для вимірювання електричну напругу;
- чутливий об'єм, виключно з якого сформований потік розсіяного випромінювання спрямовується на приймач під заданим до напрямку колімованого потоку кутом.

Чутливий об'єм сформовано оптичним способом за допомогою оптичних систем випромінювача й приймача. Метеорологічна дальність видимості (далі – МДВ) визначається на основі вимірювання напруги на виході приймача.

Основні метрологічні характеристики датчика можна визначити в лабораторних умовах, беручи до уваги наступні обставини. По-перше, у процентному відношенні нефелометричні вимірювачі МДВ найчастіше використовуються в умовах природних туманів та густих серпанків, тобто

в тих випадках, коли МДВ залежить в основному від закономірностей розсіяння світла на краплях води. По-друге, мікрофізичні та оптичні властивості природних туманів неодноразово успішно моделювалися в лабораторних умовах за допомогою стаціонарних і потокових камер штучного туману. По-третє, МДВ в туманах однозначно залежить від показника розсіяння світла, який визначається оптичними й мікрофізичними параметрами крапель туману. По-четверте, показник розсіяння для штучного туману можна із прийнятною точністю визначити за допомогою експериментального дослідження його мікроструктури та розрахунків фактора ефективності розсіяння світла його краплями на основі теорії розсіяння світла на діелектричній сфері. По-п'яте, чутливий об'єм датчика має відносно невеликі розміри, що надає можливість створювати в зоні чутливого об'єму стабільний штучний туман.

У цій роботі наведено методи й результати лабораторних досліджень для визначення наступних характеристик датчика: структури чутливого об'єму, оптимального значення кута реєстрації розсіяного випромінювання, світлової характеристики, коефіцієнта перетворення, характеристики перетворення, діапазону вимірюваних значень МДВ та похибки їх вимірювання.

Визначення оптимального кута реєстрації розсіяного випромінювання

Випромінювач датчика створює в досліджуваному середовищі колімований потік випромінювання з довжиною хвилі $\lambda_r = 0,85$ мкм. Як відомо, для часток із розмірами, значно меншими λ_r , відповідна індикатриса розсіяння симетрична до напрямку колімованого потоку і будь-якого перпендикулярного напрямку в площині, що проходить через частку. Тобто потік випромінювання, розсіяний часткою в передню напівсферу, дорівнює потоку, розсіяному в задню напівсферу. Зі збільшенням розмірів часток розсіяний в передню напівсферу потік відповідно збільшується, індикатриса розсіяння “витягується” вперед, інтенсивність розсіяного потоку $I(\theta)$ в інтервалі малих кутів розсіяння θ відповідно зростає. Розміри часток природних аеросупензій, що суттєво впливають на видимість, становлять від $\sim 0,2$ мкм (серпанки) до кількох міліметрів (снігопади, дощі) [1]. Отже, чим менший кут θ_0 , під яким датчик реєструє розсіяне випромінювання, тим більша амплітуда $U(\theta_0)$ його корисного сигналу.

Разом з тим, зі зменшенням кута θ_0 , збільшується вплив на приймач паразитного потоку випромінювання, що виходить із випромінювача. Паразитний потік утворюється в результаті розсіяння потоку від джерела випромінювання на внутрішніх елементах та об'єктиві випромінювача. Для захисту приймача від паразитного випромінювання використовують бленди – розрізані навкоси металеві циліндричні патрубки, які встановлюють на випромінювач та приймач. Форма й розміри бленд визначаються співвідношенням:

$$\frac{D}{L} = \operatorname{tg}\alpha, \quad (1)$$

де D – зовнішній діаметр корпусів випромінювача й приймача, L – довжина бленди, α – кут між площиною зрізу бленди і її віссю. Оптимальне значення α дорівнює $\theta_0/2$. Значення кута α для встановлених на датчику бленд дорівнює $\sim 21^\circ$. Отже, за цими даними для датчика оптимальний кут реєстрації розсіяного випромінювання θ_0 має дорівнювати $\sim 42^\circ$. ($\theta_0 = 2\alpha = 42^\circ$). Від значення кута θ_0 суттєво залежать такі важливі параметри датчика як його чутливість та відношення “сигнал – шум”.

З іншого боку, оптимальне значення кута θ_0 необхідно узгодити з діапазоном вимірюваних датчиком значень МДВ, щоб зменшити похибку вимірювання. Річ у тім, що датчик, як спрямований нефелометр, реєструє розсіяне випромінювання під заданим кутом θ_0 , тоді як співвідношення між $I(\theta_0)$ і показником розсіяння β залежить від типу індикатриси, тобто від дисперсності часток аеросуспензії. Як показують результати польових досліджень розсіяння світла в приземному шарі атмосфери [2], нормовані індикатриси розсіяння $\rho(\theta)$, зареєстровані під час різноманітних метеорологічних ситуацій, можна розділити на 10 класів за величиною відношення світлових потоків, розсіяних у передню і задню напівсфери. До речі, нормована індикатриса $\rho(\theta) = \beta(\theta)/\beta$, де $\beta(\theta)$ – об'ємний кутовий коефіцієнт розсіяння або абсолютна індикатриса). Графіки $\rho(\theta)$ всіх десяти класів перетинаються між собою в діапазоні значень відповідних кутів перетинання θ_c від ~ 20 до $\sim 70^\circ$. За значень кута $\theta_c \approx 45^\circ$ відповідний набір значень ординат $\rho(45^\circ)$ всіх класів можна охарактеризувати одним середнім значенням $\rho(45^\circ)$ із похибкою $\pm 15\%$. Це означає, що за будь-яких метеорологічних ситуацій нефелометричний вимірювач, створений як спрямований нефелометр, може визначати МДВ

з похибкою $\pm 15\%$ без врахування відповідних технічних характеристик, а зв'язок між його корисним сигналом $U(45^\circ)$ і показником розсіяння β з похибкою $\pm 15\%$ визначається співвідношенням: $\beta = K(45^\circ)U(45^\circ)$.

У разі поступового обмеження набору класів індикатрис $\rho(\theta)$, відповідним чином зменшується діапазон кутів їх перетину $\Delta\theta_c$ і певне середнє значення кута перетину θ_c , так що будь-якому конкретному оптичному стану атмосфери (значення МДВ) відповідає набір із кількох індикатрис $\rho(\theta)$, що мало відрізняються за параметрами. Причому, чим менша МДВ, тим менший відповідний кут θ_c .

Датчик призначений для визначення МДВ в діапазоні $(0,02 \div 10)$ км. Як показано в [2], значенню МДВ ≈ 10 км відповідає кут $\theta_c \approx 40^\circ$, а за МДВ ≈ 1 км, $\theta_c \approx 30^\circ$. Нормовані індикатриси густих туманів перетинаються між собою кута $\theta_c \approx 20^\circ$. Якщо припустити, що значення $\theta_c \approx 20^\circ$ відповідає МДВ ~ 20 м, то для вимірюваного датчиком діапазону МДВ значення оптимального кута θ_0 має відповідати $\theta_c \sim 30^\circ$.

Згідно з формулою (1) за $\theta = 30^\circ$ кут зрізу бленд $\alpha = 15^\circ$ і довжина бленд L збільшиться до ~ 30 см. Відстань між об'єктивними випромінювача й приймача датчика дорівнює ~ 100 см. Тобто бленди, займаючи дві третини цієї відстані, практично нависнуть над чутливим об'ємом датчика і можуть суттєво впливати на оптичний стан досліджуваного середовища (наприклад, під час дощів) у межах чутливого об'єму.

Таким чином, доцільно дещо збільшити значення оптимального кута θ_0 , наприклад, вибрати для цього значення $\theta_0 = 35^\circ$, що відповідає середньому значенню кутів перетину індикатрис $\rho(\theta)$ у діапазоні МДВ від ~ 1 км до ~ 10 км. При цьому похибка середнього значення $\rho(35^\circ)$, згідно з викладеним у [2], буде меншою 10% .

У подальших дослідженнях характеристик датчика кут реєстрації розсіяного потоку θ_0 дорівнював 35° .

Визначення характеристик чутливого об'єму датчика

Під час дослідження датчика за допомогою описаної в [3] установки його чутливий об'єм має бути розміщений у вертикальному потоці туману з поперечним перерізом $\sim 7 \times 12$ см². Для цього необхідно мати чітке уявлення про розміри чутливого об'єму та просторовий розподіл локальної чутливості датчика.

Характеристики визначені за допомогою зонда-розсіювача випромінювання колімованого потоку. Зонд мав форму сфери діаметром ~ 4 мм, виготовленої з пінополіуретану й закріпленої на торці тонкого металевого стержня, пофарбованого в чорний колір. Другий кінець стержня був закріплений на координатному механізмі, за допомогою якого зонд переміщували в області чутливого об'єму в трьох взаємоперпендикулярних напрямках "x", "y" і "z". Координати "x" відповідали переміщенню зонда вздовж напрямку випромінювач – приймач, координати "y" відповідали переміщенням у горизонтальному напрямку, перпендикулярному до осі "x", координати "z" – вертикальним переміщенням зонда. Локальна чутливість датчика в залежності від названих координат оцінювалася за напругою U на виході приймача. Початок системи координат відповідав розташуванню зонда в зоні максимального значення U. Отримані результати наведено в табл.1.

Таблиця 1

Дані дослідження характеристик чутливого об'єму датчика

Координата Y		Координата X		Координата Z	
Y, мм	U, В	X, мм	U, В	Z, мм	U, В
1	2	3	4	5	6
		-40	2,4		
		-35	3,05		
		-30	3,7		
		-25	4,5		
-20	0,1	-20	5,4		
-15	1,0	-15	6,3	-15	0,8
-10	4,6	-10	7,1	-10	3,4
-5	7,4	-5	7,7	-5	7,3
0	8,2	0	8,2	0	8,2
5	7,6	5	8,1	5	7,3
10	6,1	10	8,05	10	6,0
15	2,9	15	8,0	15	5,3
20	0,1	20	7,65	20	4,5
		25	7,0	25	3,1
		30	6,2	30	2,0
		35	5,2		
		40	3,9		

За даними табл. 1 для наочного сприйняття розмірів чутливого об'єму та розподілу в ньому локальної чутливості датчика побудовано рис. 1, 2 і 3.

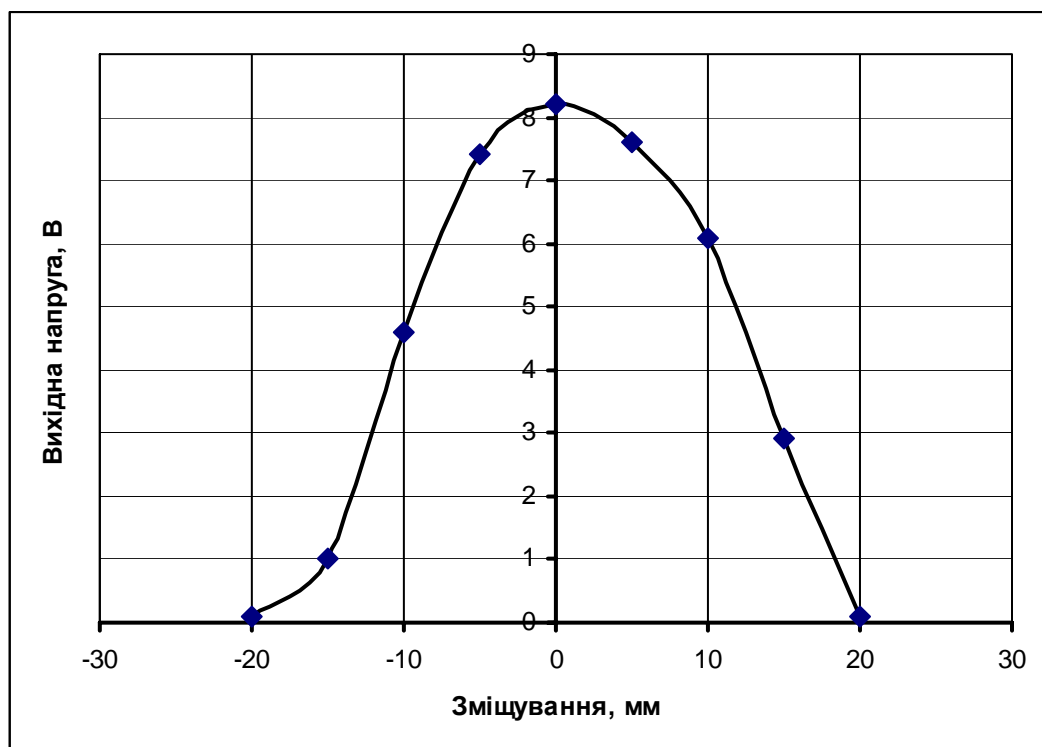


Рис. 1. Розподіл локальної чутливості датчика вздовж осі "у"

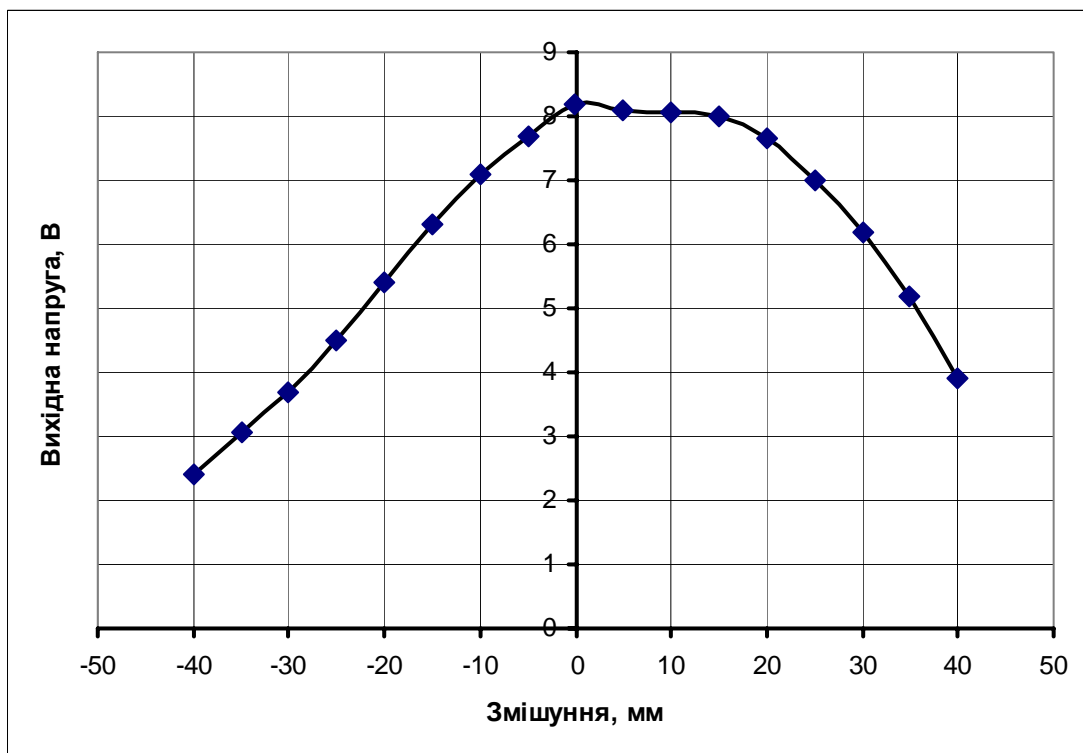


Рис. 2. Розподіл локальної чутливості датчика вздовж осі "х"

Зміщення зонда відносно початку системи координат відкладено на осі абсцис, а відповідне значення напруги U на виході приймача – на осі ординат.

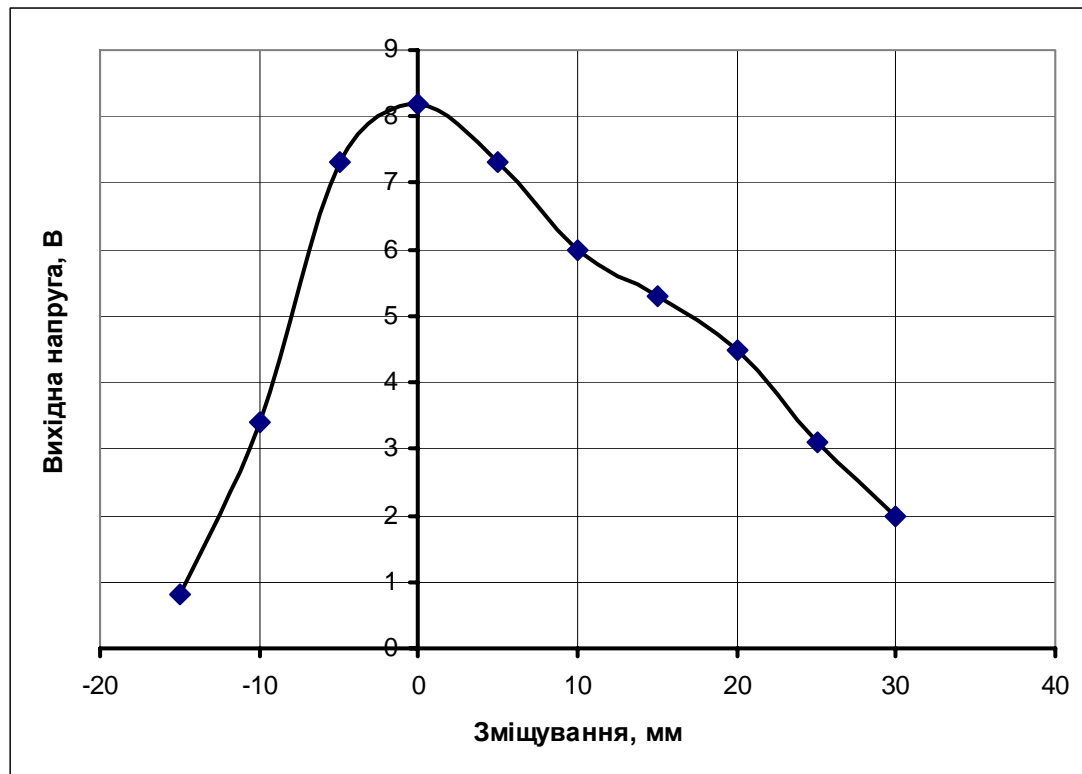


Рис. 3. Розподіл локальної чутливості датчика вздовж осі "z"

З наведених рисунків видно, що: різні зони чутливого об'єму дають різний внесок у загальну чутливість датчика, чутливість зменшується в напрямках периферії чутливого об'єму; зона максимальної локальної чутливості дещо зміщена щодо геометричного центра чутливого об'єму; розміри чутливого об'єму дають можливість повністю розмістити його в потоці тестового туману з поперечним перерізом $\sim 7 \times 12 \text{ см}^2$.

Визначення світлової характеристики

Світлова характеристика датчика визначена на основі даних експериментального дослідження залежності напруги на виході приймача U від потоку розсіяного випромінювання F , джерело якого знаходилося в чутливому об'ємі. Максимальний потік розсіяного випромінювання (F_{\max}) створювали за допомогою зонда – світлої бавовняної нитки, яка в горизонтальному напрямку перетинала чутливий об'єм перпендикулярно до напрямку випромінювач – приймач. Значення потоку $F = \xi F_{\max}$ задавали за допомогою скляних світлофільтрів типу НС (з набору

світлофільтрів ГОСТ 9411 – 81), які встановлювали перед об'єктивом оптичної системи приймача. Використано фільтри з коефіцієнтом поглинання $\xi = 0,729$ (НС1); $0,379$ (НС6); $0,236$ (НС3); $0,197$ (НС7) та $0,072$ (НС8) для випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 0,850$ мкм.

В умовах лабораторного приміщення колімований потік випромінювання розсіюється на предметах лабораторного обладнання, створюючи потік паразитного випромінювання, який негативно впливає на роботу приймача. Щоб унеможливити вплив паразитного випромінювання, використано дві світлові пастки, які встановлювалися на осях оптичних систем випромінювача й приймача за чутливим об'ємом. Отримані результати наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати дослідження світлової характеристики датчика

Тип фільтра	Коефіцієнт пропускання $\xi = \frac{F}{F_0}$	Вихідна напруга $U, В$	Коефіцієнт ослаблення вихідної напруги $\varphi = \frac{U}{U_{\max}}$	Апроксимація лінійною функцією $\varphi = 1.0044 \cdot \xi + 0.0007$	Похибка лінійної апроксимації, %
1	2	3	4	5	6
Фільтр відсутній	1	9,60	1	1,0051	-0,51
НС1	0,729	7,00	0,729167	0,732908	-0,37409
НС6	0,379	3,78	0,39375	0,381368	1,23824
НС3	0,236	2,26	0,235417	0,237738	-0,23217
НС7	0,197	1,98	0,20625	0,198567	0,76832
НС1 + НС7	0,144	1,46	0,152083	0,145334	0,674973
НС3 + НС6	0,0894	0,907	0,094479	0,090493	0,398581
НС6 + НС7	0,075	0,798	0,083125	0,07603	0,7095
НС8	0,0723	0,731	0,076146	0,073318	0,282771
НС7 + НС7	0,0388	0,417	0,043438	0,039671	0,376678
НС6 + НС8	0,0274	0,292	0,030417	0,028221	0,219611
НС8 + НС7	0,0142	0,152	0,015833	0,014962	0,087085
НС8 + НС7 + НС1	0,01038	0,11	0,011458	0,011126	0,033266
НС8 + НС7 + НС6	0,0054	0,06	0,00625	0,006124	0,012624
НС8 + НС8	0,00523	0,053	0,005521	0,005953	-0,04322
НС8 + НС7 + НС3	0,00336	0,036	0,00375	0,004075	-0,03248
НС8 + НС7 + НС7	0,00281	0,032	0,003333	0,003522	-0,0189
НС8 + НС8 + НС6	0,00198	0,021	0,002188	0,002689	-0,05012
НС8 + НС8 + НС3	0,00123	0,012	0,00125	0,001935	-0,06854
НС8 + НС8 + НС7	0,00103	0,011	0,001146	0,001735	-0,05887
$F = 0$	0	0,007	0,000729	0,0007	0,002917

На рис. 4 показано загальний вигляд світлової характеристики датчика, побудованої за даними табл. 2.

По осі абсцис відкладено значення коефіцієнта пропускання ξ фільтрів типу НС, за допомогою яких максимальне значення потоку випромінювання від зонда F_{\max} ослаблювалось до значення F . По осі ординат – значення коефіцієнта ослаблення ϕ максимальної напруги на виході приймача U_{\max} , що відповідало F_{\max} : $\xi = F/F_{\max}$, а $\phi = U/U_{\max}$. Максимальне значення потоку випромінювання F_{\max} підбирали експериментально шляхом переміщення зонда в чутливому об'ємі з таким розрахунком, щоб відповідне значення U_{\max} не перевищувало верхньої межі динамічного діапазону приймача.

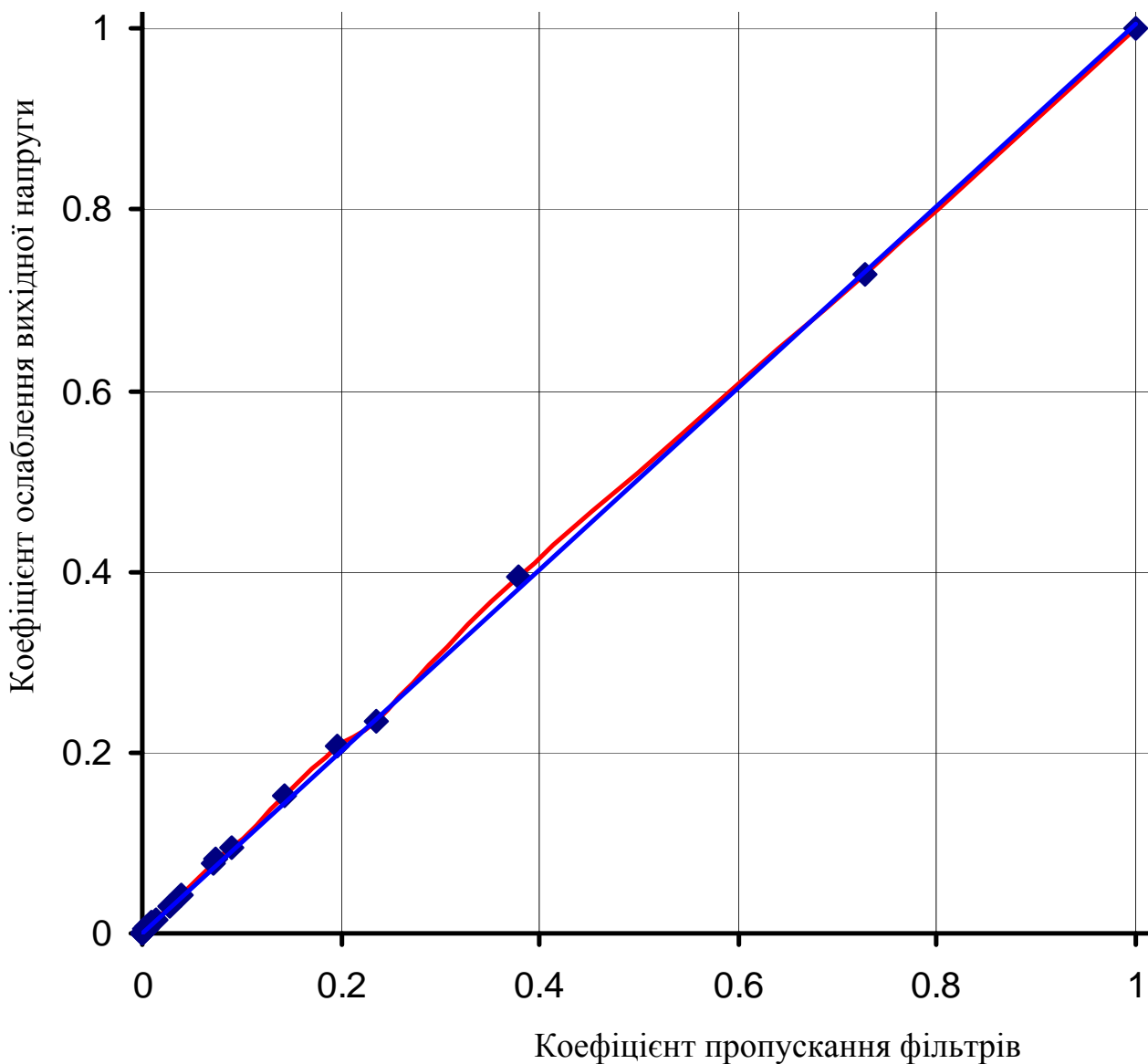


Рис. 4. Світлова характеристика датчика

За значень $F > F_{\max}$ значення $U > U_{\max}$ відповідали переходу приймача в режим насичення. Точками показані значення залежності $\varphi(\xi)$, отримані в експерименті. Суцільна пряма лінія – графік функції, що апроксимує експериментальні дані. Вона має вигляд:

$$\varphi = 0,0007 + 1.0044\xi . \quad (2)$$

Відхилення експериментальних даних від розрахованих за формулою (2) наведено в останньому стовпчику табл. 2.

Визначення коефіцієнта перетворення

За означенням МДВ залежить від порога контрастної чутливості людського зору ε . Значення ε пов'язане з психофізіологічними властивостями спостерігача. Дослідження показали, що для переважної більшості людей із нормальним зором значення ε припадають на інтервал $\sim 0,02 \div 0,05$, а максимум розподілу відповідає $\varepsilon = 0,03$. Щоб уникнути невизначеності під час застосування інструментальних засобів вимірювання МДВ, у промислово розвинених країнах для ε прийнято одне стандартне значення, яке дорівнює 0,05 [4]. У такому разі МДВ набуває ознаки оптичної характеристики атмосферного середовища, яку можна виразити через такі чітко визначені фізичні параметри як прозорість, коефіцієнт пропускання, показник розсіяння.

У разі застосування нефелометричного методу для визначення МДВ використовують формулу:

$$\text{МДВ} = 3/\beta, \quad (3)$$

де β – показник розсіяння середовищем видимого випромінювання.

Як видно з формули (3), графік залежності МДВ від β має вигляд гіперболи типу $x \cdot y = \alpha$ (α – сталий коефіцієнт), асимптоти якої збігаються з осями прямокутної системи координат. Отже, для того щоб на основі формули (3) побудувати характеристику перетворення для всього динамічного діапазону датчика, необхідно створити значну кількість тестових середовищ з відомими значеннями β , і в кожному випадку визначити коефіцієнт перетворення шляхом порівняння β з відповідною напругою U на виході приймача.

Експериментальне визначення співвідношення між МДВ і U суттєво спрощується, якщо використати штучний туман як тестове середовище. У

такому разі потік розсіяного випромінювання, який реєструє приймач, пропорційний показнику розсіяння випромінювання тестовим середовищем. Світлова характеристика датчика в загальному вигляді може бути виражена лінійним рівнянням типу:

$$\varphi = \varphi_0 + K \xi_\lambda, \quad (4)$$

де $\varphi = U / U_{\max}$, $\varphi_0 = U_0 / U_{\max}$, K – сталий коефіцієнт, а $\xi_\lambda = F_\lambda / F_{\lambda\max}$ – коефіцієнт пропускання випромінювання з довжиною хвилі λ для фільтрів типу НС.

З урахуванням наведених означень величин, що входять у формулу (4), її можна записати в такому вигляді:

$$U = U_0 + \alpha F_\lambda, \quad (5)$$

де U_0 – напруга на виході приймача за $F_\lambda = 0$, $\alpha = KU_{\max} / F_{\lambda\max}$ – сталий коефіцієнт, а F_λ – частина розсіяного зондом випромінювання колімованого потоку, що виходить з чутливого об'єму і реєструється приймачем.

Структура формули (5), очевидно, не залежить від способу формування потоку F_λ у разі заданого значення λ .

Під час використання датчика як вимірювача МДВ потік F_λ залежить від розсіювальної здатності досліджуваного середовища, тобто він пропорційний показнику розсіяння (β_λ) випромінювання з довжиною хвилі λ . Датчик створює колімований потік випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 0,85$ мкм. Однак МДВ характеризує прозорість атмосферного середовища для видимого випромінювання з довжиною хвилі $\lambda \approx 0,55$ мкм, яка відповідає максимальній чутливості людського зору. Тоді як показник розсіяння тестового штучного туману має бути визначений для випромінювання з $\lambda = 0,55$ мкм.

Як показано в [1], показник ослаблення видимого випромінювання в природних туманах слабо залежить від довжини хвилі. З іншого боку, випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 0,85$ мкм практично не поглинається водяною парою. Отже, можна вважати, що $\beta(0,85\text{мкм}) \approx \beta(0,55\text{мкм}) \approx \beta$ – показнику розсіяння світла в штучному тумані. Тоді згідно з формулою (5) співвідношення між показником розсіяння (β) видимого випромінювання в штучному тумані і напругою (U) на виході приймача можна записати в такому вигляді:

$$\beta = \eta (U - U_0), \quad (6)$$

де η – коефіцієнт перетворення.

З викладеного вище випливає, що коефіцієнт перетворення η не залежить від мікроструктури як природних, так і штучних туманів. У лабораторних умовах його та інші характеристики можна визначити за допомогою штучного туману, мікроструктура якого оптимальна з погляду придатності вибраного методу її вимірювання та технічних можливостей апаратури. Згідно з формулою (6) для вибраного тестового штучного туману показник перетворення η розраховується таким чином:

$$\eta = \bar{\beta} / (\bar{U} - U_0), \quad (7)$$

де $\bar{\beta}$ – визначений незалежним способом показник розсіяння світла в штучному тумані, \bar{U} – відповідне значення напруги на виході приймача під час дослідження штучного туману.



Рис. 5. Зовнішній вигляд компонування обладнання для визначення метрологічних характеристик датчика

Установку для створення тестового штучного туману та метод визначення його показника розсіяння світла $\bar{\beta}$ описано в [3]. Зовнішній вигляд установки і датчика наведено на рис. 5.

У ході експериментального визначення коефіцієнта перетворення η використано штучний туман, показник розсіяння якого $\bar{\beta}$ дорівнював $\sim 6,4 \text{ км}^{-1}$. Чутливий об'єм датчика розташовували в потоці туману таким чином, щоб напруга на виході приймача досягала максимального (для даного туману) рівня. Це означало, що чутливий об'єм цілком занурений у потік туману. Далі в довільному часовому режимі реєстрували значення напруги U_i на виході приймача. Отримані значення напруги U_1 та результати їх статистичної обробки наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Результати визначення середньої напруги на виході датчика

№ вимірювання	$U_i, \text{ mV}$	$U_i - \bar{U}$	$(U_i - \bar{U})^2$
1	2	3	4
1	527	-26,225	687,7506
2	517	-36,225	1312,250
3	546	-7,225	52,20062
4	525	-28,225	796,6506
5	564	10,775	116,1006
6	555	1,775	3,150625
7	518	-35,225	1240,800
8	561	7,775	60,45062
9	548	-5,225	27,30062
10	537	-16,225	263,2506
11	546	-7,225	52,20062
12	526	-27,225	741,2006
13	568	14,775	218,3006
14	557	3,775	14,25062
15	545	-8,225	67,65062
16	532	-21,225	450,5006
17	522	-31,225	975,0006
18	560	6,775	45,90062
19	582	28,775	828,0006
20	574	20,775	431,6006
21	566	12,775	163,2006

1	2	3	4
22	535	-18,225	332,1506
23	558	4,775	22,80062
24	555	1,775	3,150625
25	572	18,775	352,5006
26	553	-0,225	0,050625
27	545	-8,225	67,65062
28	548	-5,225	27,30062
29	531	-22,225	493,9506
30	556	2,775	7,700625
31	574	20,775	431,6006
32	584	30,775	947,1006
33	583	29,775	886,5506
34	564	10,775	116,1006
35	572	18,775	352,5006
36	549	-4,225	17,85062
37	566	12,775	163,2006
38	579	25,775	664,3506
39	558	4,775	22,80062
40	571	17,775	315,9506
	$\Sigma = 22129$		$\Sigma = 13772,97$
	$\bar{U} = 553,225 \text{ mV}$		$\sigma = 2,971334$

Як видно з табл. 3, під час порівняння напруги на виході приймача з середнім значенням показника розсіяння світла $\bar{\beta}$ в штучному тумані відповідне середнє значення напруги $\bar{U} = 553,2$ мВ. Тоді як згідно з формулою (2) та її записом у вигляді (5) у разі відсутності потоку розсіяного випромінювання з чутливого об'єму ($F_{\lambda} = 0$) напруга на виході приймача $U_0 = 7$ мВ. Отже, в ході експерименту $U_0 \ll \bar{U}$. Отже, нехтуючи U_0 у формулі (7), для коефіцієнта перетворення отримаємо значення $\eta = \frac{\bar{\beta}}{\bar{U}} = \frac{6,4}{0,553} = 11,57 \text{ км}^{-1} \cdot \text{В}^{-1}$.

Визначення характеристики перетворення

Враховуючи специфіку лабораторного методу визначення коефіцієнта перетворення, характеристику перетворення необхідно будувати як залежність $\beta(U)$, тобто на основі формули (6). Підставляючи у формулу (6) отримане значення коефіцієнта перетворення, знайдемо, що характеристика перетворення визначається виразом:

$$\beta = 11,57(U - U_0), \quad (8)$$

якщо β виражати в км^{-1} , а U та U_0 у В.

Однак шкала датчика, що побудована на основі формули (8), мало придатна для практичної оцінки прозорості атмосферного середовища. Тому для наочної оцінки прозорості (МДВ) і метрологічних можливостей датчика доцільно його характеристику перетворення (8) формально записати у вигляді залежності МДВ(U). Підставляючи вираз (8) у формулу (3), отримаємо:

$$\text{МДВ} = \frac{3}{11,57(U - U_0)}. \quad (9)$$

Графік характеристики перетворення, побудований на основі формули (9) та з урахуванням лінійності світлової характеристики датчика, показано на рис. 6.

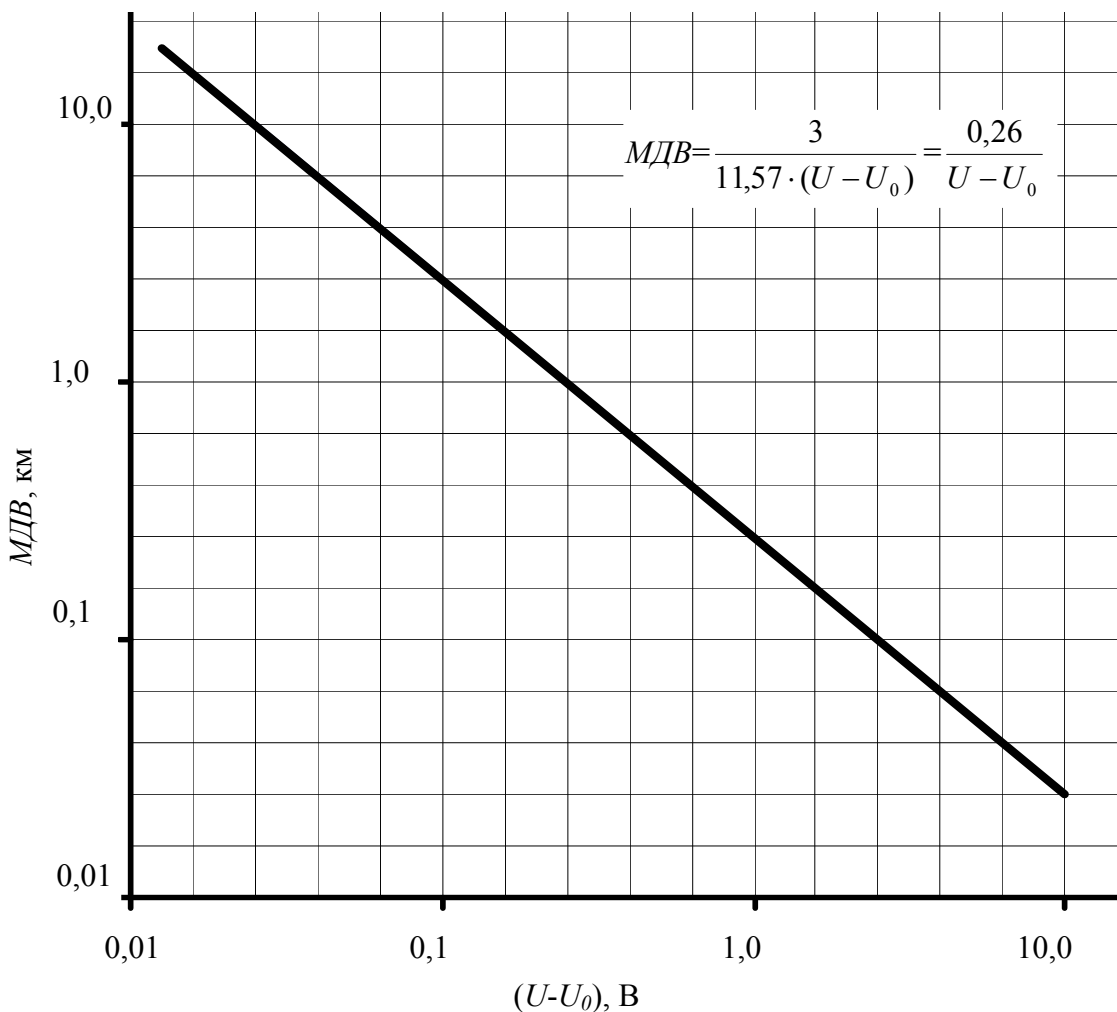


Рис. 6. Графік характеристики перетворення

Визначення діапазону вимірюваних значень

У межах лінійності світлової характеристики датчика максимальне значення напруги на виході приймача U_{\max} (верхня межа динамічного діапазону) не повинно перевищувати 9,60 В. Тоді, підставляючи це значення U_{\max} у формулу (9), отримуємо, що нижня межа діапазону вимірювання МДВ_{min} дорівнює ~ 30 м. Верхню межу діапазону вимірювання МДВ_{max} можна оцінити, припустивши, що нижня межа динамічного діапазону приймача U_{\min} дорівнює, наприклад, $3U_0$, тобто, 21 мВ. Тоді, згідно з формулою (9) верхня межа діапазону вимірювання МДВ_{max} = 18,5 \approx 20 км.

Таким чином, згідно з отриманими результатами датчик може бути використаний для визначення МДВ у діапазоні від ~ 30 м до ~ 20 км.

Визначення відносної похибки вимірювання

Як показує формула (3), під час визначення МДВ за допомогою нефелометричного методу основна задача експериментального дослідження атмосферного середовища полягає у вимірюванні показника розсіяння світла β . При цьому відносна похибка δ (МДВ) визначається виключно відносною похибкою $\delta\beta$. Характеристика перетворення, отримана для датчика у вигляді співвідношення (9), побудована на основі лінійної залежності (6). Згідно з (6) вираз для похибки $\delta\beta$ можна записати в такому вигляді:

$$\delta\beta = \delta\eta + \delta(U - U_0), \quad (10)$$

де $\delta\eta$ – відносна похибка визначення коефіцієнта перетворення η , а $\delta(U - U_0)$ – відносна похибка вимірювання різниці напруг на виході приймача, яка відповідає показнику розсіяння β досліджуваного середовища.

За означенням $\delta(U - U_0) = \Delta(U - U_0)/(U - U_0)$, де $\Delta(U - U_0)$ – абсолютна похибка вимірювання різниці напруг, а $U_0 = \text{const}$ – напруга на виході приймача в разі відсутності потоку розсіяного випромінювання з чутливого об'єму (об'єктів оптичної системи приймача закритий непроникним екраном).

Під час зменшення β (збільшення МДВ) напруга на виході приймача U наближається до значення U_0 , в результаті чого похибка $\delta(U - U_0)$ збільшується. Навпаки, зі збільшенням β (зменшення МДВ) напруга U зростає, що веде до зменшення похибки $\delta(U - U_0)$.

Для відносно малих значень МДВ похибку вимірювання можна оцінити наступним чином. Розглянемо природні тумани, з показниками розсіяння $\beta \geq \bar{\beta} = 6,4 \text{ км}^{-1}$ (туман з відповідним значенням МДВ $\leq 470 \text{ м}$). У таких випадках напруга на виході приймача U буде не меншою, ніж $\bar{U} = 553 \text{ мВ}$. Тоді на основі формули (6) можна записати, що:

$$\delta\beta = \delta\eta + \delta U, \quad (11)$$

оскільки завжди $U_0 = 7 \text{ мВ}$ набагато менше ніж U .

Коефіцієнт перетворення η визначено експериментальним способом. Згідно з формулою (7) похибка його визначення:

$$\delta\eta = \delta\bar{\beta} + \delta(\bar{U})_{\alpha} + \delta U, \quad (12)$$

де $\delta\bar{\beta}$ – відносна похибка середнього значення показника розсіяння $\bar{\beta}$ для штучного туману, $\delta(\bar{U})_{\alpha}$ – межа відносної випадкової похибки відповідного $\bar{\beta}$ середнього значення напруги, а δU – відносна похибка вимірювання напруги.

У ході експериментального визначення коефіцієнта перетворення η використано штучний туман, для якого згідно з [3] показник розсіяння світла $\bar{\beta}$ дорівнює $6,4 \text{ км}^{-1}$, а його відносна систематична похибка $\delta\bar{\beta}_s = 0,1$, тобто довірчі межі систематичної похибки без урахування знаку становлять $\Delta\bar{\beta}_s = 0,1 \cdot 6,4 = 0,64 \text{ км}^{-1}$.

Випадкова похибка $\delta\bar{\beta}_{\alpha}$ під час дослідження датчика безпосередньо не визначалася. Її можна оцінити на основі формули (6), використавши дані спостережень за зміною значень напруги U_i на виході приймача. Згідно з формулою (6) середньоквадратичне відхилення випадкових значень β_i від $\bar{\beta}$ дорівнює $\sigma(\bar{\beta}_{\alpha}) = \eta\sigma(\bar{U}) = 11,57 \cdot 0,003 = 0,035 \text{ км}^{-1}$.

У такому разі з урахуванням значення коефіцієнта Ст'юдента $t = 2,02$ для числа спостережень $n = 40$ довірчі межі випадкової похибки дорівнюють (без урахування знаку) $\Delta\bar{\beta}_{\alpha} = t \cdot \sigma(\bar{\beta}_{\alpha}) = 2,02 \cdot 0,035 = 0,07 \text{ км}^{-1}$, що майже на порядок менше довірчих меж систематичної похибки $\Delta\bar{\beta}_s = 0,64 \text{ км}^{-1}$.

Таким чином, нехтуючи випадковою похибкою, можна прийняти, що загальна відносна похибка визначення показника розсіяння $\bar{\beta}$ для штучного туману дорівнює $\delta\bar{\beta} = \delta\bar{\beta}_s = 0,1$.

Похибка вимірювання напруги за допомогою вольтметра типу В7-27А визначається за формулою:

$$\delta U = [1 + 0,5 \left(\frac{U_{\kappa}}{U} - 1 \right)]. \quad (13)$$

Для діапазону $\Delta U = (0,1 \div 1,0)$ В отримаємо:

$$\delta U = [1 + 0,5 \left(\frac{1,0}{0,553} - 1 \right)] = 1,4 \ %.$$

Отже, згідно з [5] похибками $\delta(U)_{\alpha}$ та δU можна знехтувати, оскільки $\delta(\bar{U})_{\alpha} \sim \delta U \ll \delta \bar{\beta}$.

Таким чином, враховуючи викладене вище, можна стверджувати, що за МДВ менших як 1 км, відносна похибка вимірювання $\delta(\text{МДВ})$ не перевищує 10 %, оскільки в даному разі $\delta(\text{МДВ}) = \delta\beta \approx \delta\eta \approx \delta\bar{\beta} \leq 10 \ %$.

За МДВ > 1 км до встановлених 10 % слід додати відповідну МДВ похибку $\delta(U - U_0)$ згідно з формулою (10). Наприклад, для верхньої межі вимірюваних МДВ, рівної 20 км, напруга на виході приймача $U_{\min} \approx 20$ мВ. Згідно з формулою (13) в діапазоні (10 ÷ 100) мВ $\delta U_{\min} \approx 3\%$. Тоді абсолютна похибка $\Delta U = 0,03 \cdot 20 = 0,6$ мВ. Припускаючи, що $\Delta U \approx \Delta U_0$, знайдемо: $\delta(U - U_0) = 2\Delta U / (U - U_0) = 1,2 / 14 \approx 0,09 = 9 \ %$. Отже, якщо МДВ ~ 20 км, похибка $\delta(\text{МДВ}) \sim 10 + 9 \approx 20 \ %$.

Висновки

У лабораторних умовах проведено експериментальні дослідження основних метрологічних характеристик оптоелектронного датчика метеорологічної дальності видимості, виготовленого в ІФН НАНУ. Під час досліджень використано тестовий штучний туман. Показання датчика порівнювалися з показником розсіяння світла в штучному тумані.

У результаті проведених досліджень визначено наступні характеристики датчика:

- оптимальне значення кута між осями оптичних систем випромінювача і приймача має бути рівним $\sim 35^\circ$;
- світлова характеристика датчика може бути апроксимована лінійною залежністю $\varphi = 0,0007 + 1,0044\xi$;
- коефіцієнт перетворення $\eta = 11,57 \text{ км}^{-1}\text{В}^{-1}$ з похибкою $\pm 10 \ %$;
- характеристика перетворення може бути виражена залежністю МДВ = $3/11,57(U - U_0)$ в межах динамічного діапазону $\Delta U = U_0 \div U_{\max} = (0,007 \div 9,6)$ В та діапазону вимірюваних значень МДВ від 30 м до 20 км;
- відносна похибка вимірювання МДВ:
 - за МДВ < 1 км $\delta(\text{МДВ}) \sim 10 \ %$;
 - за МДВ ~ 20 км $\delta(\text{МДВ}) \sim 20 \ %$.

Виходячи з наведених даних можна стверджувати, що за своїми метрологічними характеристиками оптоелектронний датчик метеорологічної дальності видимості, створений у ІФН НАНУ, відповідає вимогам до інструментальних засобів визначення видимості в атмосфері. Можна рекомендувати використати його як основу для створення сучасного автоматизованого вимірювача метеорологічної дальності видимості.

* *

1. *Мак-Картни Э.* Оптика атмосферы. – М.: Мир, 1979. – 421 с.
2. *Бартенева О.Д., Довгялло В.И., Полякова В.А.* Экспериментальные исследования оптических свойств приземного слоя атмосферы // Тр. ГГО. – 1967. – Вып. 220. – С. 101-162.
3. *Алєсін А.А., Іванченко Л.В., Силаєв А.В., Товстенко Л.М.* Застосування штучного туману для калібрування нефелометричних вимірювачів видимості // Наук. пр. УкрНДГМІ. – Вип. 259. – 2010– С. 302-312.
4. *Гаврилов В.А.* Видимость в атмосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 324 с.
5. *Артемьев Б.Г., Голубев С.М.* Справочное пособие для работников метрологических служб. – М.: Изд-во стандартов, 1982.

Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут

Б.А. Иванов, В.Б. Осіс

Экспериментальные исследования основных метрологических характеристик оптоэлектронного датчика метеорологической дальности видимости в лабораторных условиях

Приведены результаты экспериментальных исследований в лабораторных условиях основных метрологических характеристик оптоэлектронного датчика метеорологической дальности видимости, который создан в ИФН НАНУ.

Ключевые слова: исследования, метрология, дальность видимости, оптоэлектронный датчик, нефелометр.

B.A. Ivanov, V.B. Osis

Experimental researches of basic metrological characteristics optical electronic of the gauge of meteorological visibility range in laboratory conditions

Of experimental researches in laboratory conditions of the basic metrological characteristics of the optical electronic gauge of meteorological visibility range which is created in IFS NASU are resulted.

Keywords: researches, metrology, visibility range, optical electronic gauge, nephelometer.