

А.А. Алесін, Л.В. Іванченко, А.В. Силаєв,
Л.М. Товстенко

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ТУМАНУ ДЛЯ КАЛІБРУВАННЯ НЕФЕЛОМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАЧІВ ВИДИМОСТІ

На основі потокової камери штучного туману створено лабораторну установку для калібрування спрямованих нефелометрів в одиницях показника розсіяння світла в тестовому середовищі. Показник розсіяння знайдено на основі результатів експериментального визначення мікрофізичних параметрів туману та теоретично розрахованих значень факторів ефективності розсіяння для його крапель. Нефелометри, прокалібровані таким методом, придатні для визначення дальності видимості в природних туманах та густих серпанках.

Ключові слова: дальність видимості, спрямований нефелометр, калібрування

Вступ

Нефелометричні вимірювачі видимості все ширше застосовуються в аеропортах промислово розвинених країн як засіб інструментального визначення метеорологічної дальності видимості на злітно-посадкових смугах. Показання нефелометричних вимірювачів значною мірою узгоджуються з показаннями трансмісометрів — зразкових приладів для визначення видимості. Проте нефелометричні вимірювачі мають значно надійніші експлуатаційні характеристики. У зв'язку з цим Міжнародна організація цивільної авіації (ІКАО) з метою координації дій різних країн розробила інструктивні рекомендації щодо подальшого удосконалення та використання нефелометричних вимірювачів видимості.

На етапі підготовки до експлуатації нефелометричні вимірювачі потребують обов'язкового калібрування. За рекомендацією ІКАО, калібрування необхідно проводити в умовах природного середовища шляхом порівняння показань нефелометричного вимірювача і трансмісометра.

Безперечно, калібрування в природних умовах забезпечує можливість всебічного дослідження реакції нефелометричного вимірювача на різноманітні природні явища: туман, серпанок, дощ, снігопад, імлу, задимленість, атмосферний аерозоль. Проте для отримання статистично забезпечених результатів експеримент такого типу потребує, по-перше, тривалого часу (залежність від погодних умов), по-друге, складного і високовартісного обладнання (трансмисометр) і, по-третє, значних організаційних зусиль. Тим часом виробник нефелометричних вимірювачів зацікавлений як у зменшенні вартості етапу калібрування, так і в скороченні його тривалості, що надає можливість оперативно усувати конструктивні недоліки, виявлені під час калібрування.

Тому доцільно скористатися можливостями лабораторного методу дослідження вимірювачів метеорологічних параметрів за допомогою штучних туманів. Тим паче, що істотне погіршення видимості для аеропортів зазвичай пов'язане з утворенням природних туманів і густих серпанків, поглинання світла якими в атмосфері незначне, а зміна видимості обумовлена лише закономірностями розсіяння світла на краплях води. А це означає, що подібні оптичні властивості атмосферного середовища можна адекватно відтворити в лабораторних умовах за допомогою штучних туманів з відповідними характеристиками їхньої мікроструктури.

У статті розглянуто метеорологічні характеристики лабораторного методу калібрування нефелометричних вимірювачів видимості за допомогою штучного туману.

Визначення метеорологічної дальності видимості за допомогою нефелометричного методу

Згідно з [1] метеорологічна дальність видимості (МДВ) визначається як відстань в атмосферному середовищі, на якій колімований світловий потік послаблюється до 0,05 від його початкового значення. У такому разі відома формула Кошмідера набуває вигляду:

$$L_m = \frac{3}{\alpha}, \quad (1)$$

де L_m – МДВ, а α – показник ослаблення світлового потоку в досліджуваному середовищі. Показник ослаблення, як відомо, дорівнює сумі показників розсіяння β та поглинання γ , тобто $\alpha = \beta + \gamma$.

Зразковим засобом визначення α вважають трансмісометр, який безпосередньо вимірює коефіцієнт пропускання колімованого потоку. Значення α обчислюють за законом Бугера. У тих випадках, коли поглинання світла в атмосферному середовищі незначне, тобто, коли $\gamma = 0$ і $\alpha = \beta$, показник ослаблення можна визначити шляхом вимірювання розсіяння, тобто за допомогою визначення β нефелометричним методом.

Під час експериментальних досліджень розсіяння світла в атмосферному середовищі використовують формулу:

$$\beta = 2\pi \int_0^{\pi} \beta(\theta) \cdot \sin\theta d\theta, \quad (2)$$

де θ – кут розсіяння, а $\beta(\theta)$ – абсолютна індикатриса (кутовий коефіцієнт розсіяння), яка визначається через відношення інтенсивності розсіяння $I(\theta)$ до початкової інтенсивності колімованого потоку I_0 . Значення β , $\beta(\theta)$ та $I(\theta)$ залежать також від коефіцієнта заломлення світла речовиною аерозольних частинок m та довжини хвилі λ колімованого потоку.

На основі формули (2) створено три типи нефелометричних пристроїв для інструментального визначення показника розсіяння: інтегральний, полярний і спрямований нефелометри. Принцип дії інтегрального нефелометра базується на вимірюванні сумарного світлового потоку, розсіяного в інтервалі значень θ від $\sim 10^\circ$ до $\sim 170^\circ$. За допомогою полярного нефелометра вимірюють абсолютну індикатрису розсіяння в тому ж інтервалі значень θ . Спрямований нефелометр діє як фотометр світлового потоку, розсіяного під постійним конструктивно визначеним кутом $\theta = \text{const}$.

Останнім часом для визначення МДВ з ряду причин використовують виключно спрямовані нефелометри.

Результати численних польових досліджень [2] показують, що зі зменшенням МДВ форма абсолютних індикатрис приземного шару атмосфери змінюється від симетричної до суттєво видовженої в напрямі розповсюдження колімованого потоку. При цьому графіки нормованих індикатрис $\rho(\theta) = \beta(\theta)/\beta$ перетинаються між собою в інтервалі кутів розсіяння θ від ~ 20 до 70° , а найменша різниця між ординатами кривих $\rho(\theta)$ існує при $\theta = 45^\circ$. Згідно з [2] для всього діапазону значень МДВ, що реалізуються в умовах атмосфери, нормована індикатриса $\rho(45^\circ) = \text{const}$ у межах похибки 15%. Отже, зв'язок між показником розсіяння β і

інтенсивністю розсіяного світла $I(45^\circ)$ можна представити у вигляді співвідношення: $\beta = K(45^\circ) \cdot I(45^\circ)$, де $K(45^\circ)$ – постійна величина.

На рис. 1 показано побудовані за експериментальними даними [2] залежності $\rho(30^\circ)$, $\rho(40^\circ)$ і $\rho(50^\circ)$ від МДВ. Експериментальні дані отримано з похибкою 10 %.

Як видно з рисунка, при $\theta = 30^\circ$ нормовану індикатрису $\rho(30^\circ)$ з похибкою 10 % можна вважати сталою величиною в межах значень МДВ від $\sim 0,2$ до 10 км. При $\theta = 40^\circ$ відповідний діапазон МДВ зростає до 50 км. При $\theta = 50^\circ$ діапазон МДВ зі сталим значенням $\rho(50^\circ)$ теж зростає, проте збільшується і відносна похибка через зменшення абсолютних значень $\rho(50^\circ)$. Певне відхилення значень $\rho(\theta)$ при МДВ ~ 1 км автори [2] вважають наслідком недостатньої статистичної забезпеченості результатів експериментів через значну нестабільність абсолютних індикатрис у зоні переходу природного туману в серпанок і навпаки.

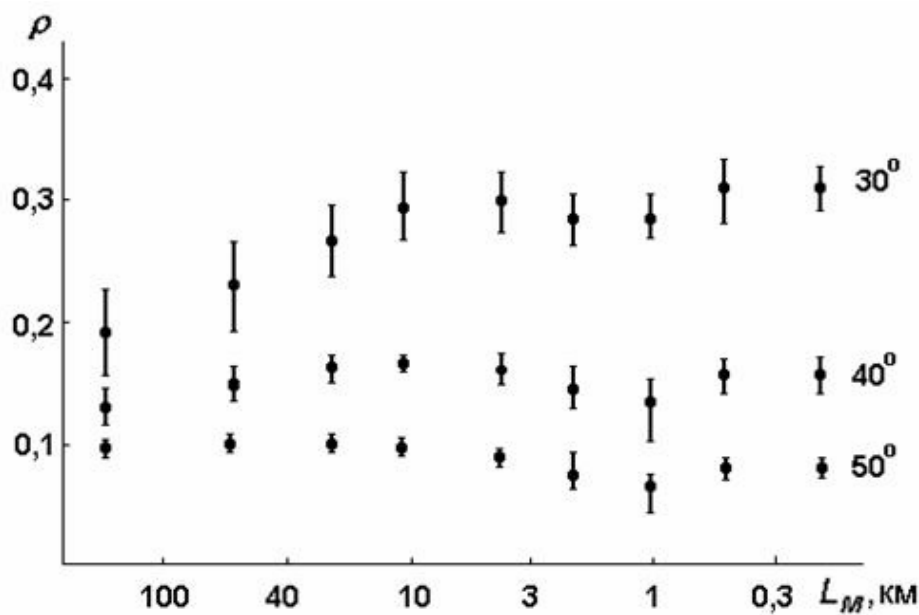


Рис. 1. Залежності нормованих індикатрис від МДВ

Наведені вище результати експериментальних досліджень підтверджують загальноприйнятту думку, що при використанні нефелометричного методу спрямована інтенсивність розсіяння $I(\theta)$ пропорційна до показника розсіяння β , тобто справедливою є формула:

$$\beta = K(\theta) \cdot I(\theta), \quad (3)$$

де $K(\theta)$ – постійна величина при заданому значенні $20 < \theta < 70^\circ$.

Оптична схема спрямованого нефелометра та установка для його калібрування

В оптичних схемах спрямованих нефелометрів (далі нефелометрів) значення θ припадає на інтервал $\sim 33 \div 42^\circ$. Конкретні значення θ встановлюються з конструкційних міркувань.

Оптична схема має три основних елементи: випромінювач, чутливий об'єм і приймач (рис. 2). Випромінювач **5** за допомогою джерела світла та оптичної системи спрямовує в досліджуване середовище колімований світловий потік. Приймач **7** реєструє частину розсіяного світла, що виходить за межі колімованого потоку під заданим кутом θ . Відкритий (механічно не обмежений) чутливий об'єм **6** формується оптичним способом у місці перетину поля зору оптичної системи приймача з колімованим потоком.

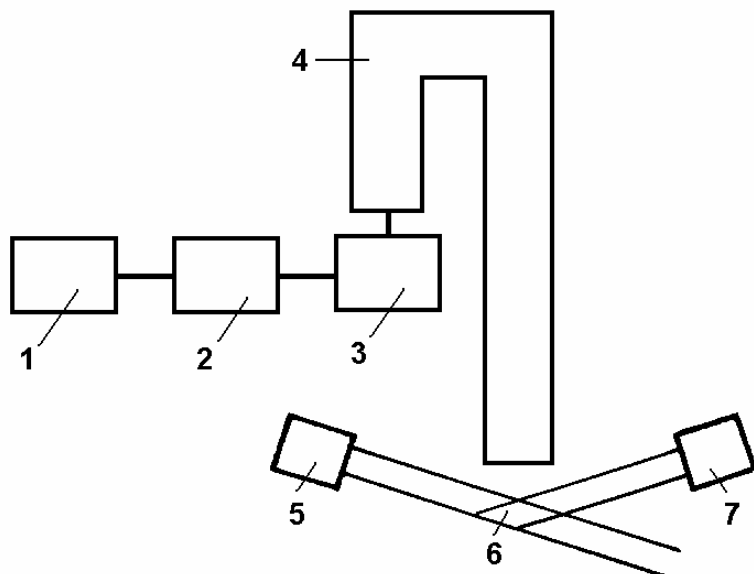


Рис. 2. Схема установки для калібрування нефелометра: **1** – нагнітач повітря, **2** – ротаметр, **3** – генератор водного аерозолі, **4** – ізотермічна потокова камера, **5** – випромінювач нефелометра, **6** – чутливий об'єм, **7** – приймач розсіяного світла

Розсіяний світловий потік, що з чутливого об'єму потрапляє на вхідну зіницю оптичної системи приймача, трансформується у відповідний електричний аналог (корисний сигнал), амплітуда якого U згідно з формулою (3) пов'язана з показником розсіяння β наступним чином:

$$\beta = \kappa U, \quad (4)$$

де κ – стала для даної конструкції нефелометра величина, за умови, що світлова характеристика приймача лінійна.

Значення κ знаходять шляхом калібрування нефелометра. У лабораторних умовах калібрування можна здійснити, розміщуючи відносно невеликий чутливий об'єм нефелометра (~ 100 мл) у тестовому середовищі з відомим значенням показника розсіяння β_0 і вимірюючи відповідне значення корисного сигналу U_0 .

Коефіцієнт розсіяння β тестового середовища (штучно створеного туману) можна незалежним шляхом визначити згідно з [3] на основі формули:

$$\beta = \sum_i \beta_i = \frac{\pi}{4} \sum_i d_i^2 N_i Q_i \quad (5)$$

в якій β_i , d_i , N_i та Q_i – відповідно середні значення показника розсіяння, діаметра, концентрації та фактора ефективності розсіяння світла для i -ої фракції розподілу крапель за розмірами.

Мікроструктура штучного туману змінюється з часом через випаровування та седиментацію крапель. Щоб зберегти незмінними значення d_i та N_i , у заданому об'ємі використовують потокову камеру туману. У камері такого типу стабільно працюючий генератор туману спрямовує його потік вздовж спеціального каналу з заданими термо- і гідродинамічними параметрами. При цьому в будь-якому поперечному перерізі каналу, в тому числі й на його виході, відповідні середні значення d_i та N_i не змінюються з часом. Отже, під час калібрування чутливий об'єм нефелометра повинен перебувати в потоці штучного туману. Крім того, вимірювання d_i та N_i повинно здійснюватися в межах чутливого об'єму. Для цього достатньо скористатися апробованим методом інерційного уловлювання крапель вузькою і тонкою пластинкою, яка певний час експонується в потоці туману [4].

Значення Q_i можна розрахувати за формулами теорії розсіяння світла на дрібних краплях води.

Для оцінки метрологічних можливостей описаного методу калібрування нефелометра було створено лабораторну установку, будову якої та її компонування з нефелометром схематично показано на рис. 2.

Установка діє наступним чином. Нагнітальний пристрій 1 створює безперервний повітряний потік, який з контрольованою ротаметром 2 заданою об'ємною швидкістю проходить через генератор (дисковий

диспергатор) водяних крапель 3. У генераторі потік повітря захоплює краплі і трансформується в потік штучного туману, який далі надходить до каналу 4 потокової камери. На початковій ділянці каналу 4 потік туману рухається вертикально догори, втрачаючи надмірно крупні краплі, що певним чином стабілізує склад крупних фракцій крапель у тестовому тумані. Після повороту каналу 4 потік туману рухається вертикально донизу і виходить з каналу до чутливого об'єму нефелометра у вигляді затопленого струменя. Форма і розміри вихідного перерізу каналу 4 забезпечують повне занурення чутливого об'єму в потік туману за відповідного розміщення нефелометра.

Визначення показника розсіяння світла в тестовому тумані

Описана установка створювала потік туману, гідродинамічні параметри якого на виході з каналу 4 з технічних причин не були відповідними до оптимальних умов інерційного відбору проб крапель на пластинку. У зв'язку з цим при визначенні мікрофізичних параметрів тестового туману до торця каналу 4 приєднували конфузори типу сопла Вітошинського [5], на виході з якого лінійна швидкість потоку збільшувалась до 565 см/с, а ступінь його турбулентності зменшувався у 50 разів.

Проби крапель, взяті на пластинку безпосередньо на виході з конфузора, фотографували під мікроскопом типу МБИ-1 з роздільною здатністю об'єктива 0,42 мкм. Розміри крапель визначали на мікрофотографіях за допомогою окулярної лінійки з ціною поділки $\Delta l = 1$ мкм. Значення d_i припадали на діапазон \sim від 8 до 100 мкм, а концентрація N_i досягала максимального значення при $d_i \approx 16$ мкм. При цьому обчислений за формулою (5) показник розсіяння β становив $6,4 \text{ км}^1$ (МДВ $\sim 0,47$ км).

Як характеристику точності отриманого результату (а також методу загалом) використовують значення його відносної систематичної похибки $\delta\beta = \Delta\beta/\beta$. Згідно з формулою (5) абсолютна похибка $\Delta\beta$ дорівнює сумі абсолютних похибок $\Delta\beta_i$, кожен з яких можна визначити з відповідної суми відносних похибок $\delta(d_i^2)$, δN_i та δQ_i .

Як показують безпосередні розрахунки, для даного спектра крапель максимальне значення $\beta_i = \beta_{i \text{ max}}$ відповідає $d_i \approx 40$ мкм. У такому разі $\delta(d_i^2) \approx 0,05$, оскільки абсолютна похибка $\Delta d_i = \Delta l = 1$ мкм.

Значення концентрацій крапель N_i розраховували за формулою [4]:

$$N_i = \frac{n_i}{E_i S V t}, \quad (6)$$

де n_i – число крапель i -ої фракції в полі зору мікроскопа з площею S , E_i – коефіцієнт захоплення крапель i -ої фракції, V – лінійна швидкість потоку туману, t – час експозиції пластинки в потоці туману.

Значення коефіцієнтів захоплення E_i розраховано методом граничних траєкторій [6]. Згідно з [6] відносна похибка розрахунку E як функції числа Стокса не перевищує 0,02. З урахуванням залежності числа Стокса від V та d значення $\delta E_i \approx 0,03$, що підтверджується безпосереднім розрахунком δE_i для $d_i = 40$ мкм.

Діаметр поля зору мікроскопа дорівнював ~ 286 мкм. Отже, якщо $\Delta l = 1$ мкм, то $\delta(S) < 0,01$, що дозволяє знехтувати як похибкою $\delta(S)$, так і похибкою $\delta(n_i)$.

Швидкість потоку туману визначали за допомогою трубки Піто з відносною похибкою $\delta V \approx 0,02$. Згідно з [5] в умовах такого експерименту ця похибка може бути зменшена до 0,01. Час експозиції пластини $t = 20$ с визначали секундоміром з ціною поділки 0,2 с, тому $\delta t = 0,01$. Отже, при $d_i \approx 40$ мкм розрахована (за методом квадратичного складання) відносна похибка $\delta N_i \approx 0,04$.

Для визначення факторів ефективності Q_i використовували наближену формулу Ван де Хюлста [3], уточнену за допомогою множника $(1+2/\varphi)$:

$$Q = \left[2 - \frac{4}{\varphi} \sin \varphi + \frac{4}{\varphi^2} (1 - \cos \varphi) \right] \cdot \left(1 + \frac{2}{\varphi} \right), \quad (7)$$

де $\varphi = 2\xi(m - 1)$, $\xi = \pi d/\lambda$, m – показник заломлення світла у воді, λ – довжина світлової хвилі. Розраховані за формулою (7) значення Q порівнювали з даними [7] для $\xi \leq 100$ та з додатково обчисленими О.А. Кривобоком за точними формулами Мі значеннями Q для $\xi = 100, 196$ та 294 , вибраними довільно. Як виявилось, відносна похибка визначення Q за формулою (7) не перевищує 0,02 при $\xi \geq 40$.

Поняття дальності видимості пов'язане з видимим діапазоном λ від $\sim 0,4$ до $0,7$ мкм. Тому значення Q_i мають бути усереднені за видимим діапазоном λ . Згідно з [8] оптичні константи води в межах видимого діапазону слабо залежать від λ . На цій підставі значення Q_i , отримані за формулою (7) при $\lambda = 0,55$, були усереднені по діапазону $\Delta\lambda = 0,4 \div 0,7$ мкм. Отриманий при цьому графік залежності $Q_i(d_i)$ набув

вигляду плавної кривої, що спадає від значення 2,14 при $d_i = 8$ мкм до значення 2,05 при $d_i = 40$ мкм. Для всіх $d_i > 40$ мкм значення Q_i з похибкою $\sim 0,02$ можна прийняти рівними 2,02.

Таким чином, при $d_i = 40$ мкм $\delta\beta_{i\max} \approx 0,11$. При $d_i > 40$ мкм абсолютні похибки $\Delta\beta_i = \delta\beta_i \cdot \beta_i < \Delta\beta_{i\max}$, оскільки зменшуються значення β_i та $\delta\beta_i$ (зменшуються δd_i^2 та δE_i , а $\delta Q_i = \text{const.}$). За $d_i < 40$ мкм похибки $\delta\beta_i > \delta\beta_{i\max}$, проте відповідні значення $\beta_i < \beta_{i\max}$, так що можна припустити, що абсолютні похибки $\Delta\beta_i \approx \Delta\beta_{i\max}$. Отже, можна очікувати, що відносна систематична похибка визначення показника розсіяння світла в тестовому тумані $\delta\beta \approx \delta\beta_{i\max}$, тобто $\delta\beta \approx 0,11$. Безпосередні розрахунки значень $\Delta\beta_i$ показали, що для даного тестового туману $\delta\beta \approx 0,12$, а якщо з нього умовно вилучити краплі, менші ніж 20 мкм, то розраховане значення $\delta\beta$ зменшиться до 0,10.

Випробування

Для оцінки практичної придатності методу калібрування нефелометрів за допомогою штучного туману проведено натурний експеримент, в якому за допомогою трансмісометра типу «Пеленг» (Білорусь) та нефелометра типу ВВ-1 (Україна, АТ «Міррад») протягом доби досліджували зміну МДВ на злітно-посадковій смузі аеропорту.

Нефелометр ВВ-1 має два ідентичні фотоелектричні датчики, побудовані на основі оптичної схеми спрямованого нефелометра з кутом реєстрації розсіяного світла $\theta \approx 42^\circ$. Його прокалібровано на основі формули (4).

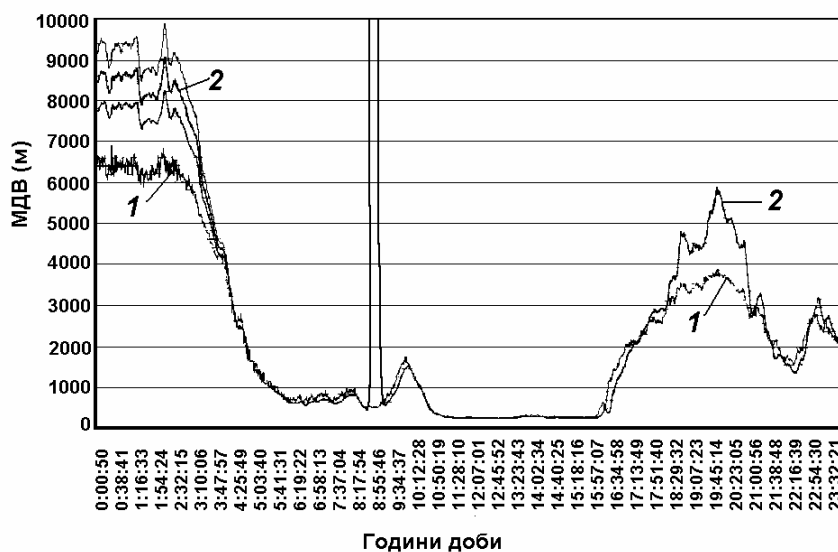


Рис. 3. Зміна МДВ протягом доби за показаннями трансмісометра (крива 1) та нефелометра (крива 2)

Калібрувальний коефіцієнт k визначено за допомогою описаного вище тестового туману. Вважалось, що значення k не залежить від МДВ. Результати одночасного вимірювання МДВ обома приладами показано на рис. 3. На осі ординат відкладено значення МДВ, на осі абсцис – час

Кривою *1* зображено хід показань трансмісометра, кривою *2* – хід середнього значення показань двох фотоелектричних датчиків нефелометра.

Як видно з рисунка, в межах діапазону МДВ $\sim 0,2-3,5$ км обидва прилади дають практично однакові значення МДВ. Дві вертикальні лінії (близько 8 год. 56 хв. ранку) відповідають короткочасному вимкненню нефелометра з технічних причин.

Це свідчить, що визначений у лабораторних умовах калібрувальний коефіцієнт k значною мірою узгоджується з оптичними властивостями природного туману в межах наведених значень МДВ.

При значеннях МДВ, більших за $\sim 3,5$ км, показання нефелометра, як правило, перевищували показання трансмісометра, що можна пояснити відносним підвищенням ролі поглинання світла в природному середовищі (серпанок) порівняно з його розсіянням, а нефелометричний метод, як відомо, чутливий лише до розсіяння світла.

Висновки

Особливості розсіяння світла в природних туманах та густих серпанках не заперечують використання штучного туману для калібрування нефелометрів, призначених для вимірювання метеорологічної дальності видимості на злітно-посадкових смугах аеропортів.

Необхідне для калібрування оптично стабільне тестове середовище може бути створене за допомогою потоку штучного туману.

Метод інерційного осадження крапель на пластинку, нормальну до потоку туману, визначає показник розсіяння світла в тестовому середовищі з відносною систематичною похибкою $\sim 10-12\%$.

* *

1. Руководство по практике наблюдений за дальностью видимости на ВПП и передаче сообщений о ней. ИКАО. Дос. 9928 – AN / 908. – 2000.
2. *Бартенева О.Д., Довгялло Е.Н., Полякова В.А.* Экспериментальные исследования оптических свойств приземного слоя атмосферы // Тр. ГГО, 1967. – Вып. 220. – С. 101-162.

3. *Мак-Картни Э.* Оптика атмосферы. – М.: Мир, 1979. – 421 с.
4. *Левин Л.М.* Исследования по физике грубодисперсных аэрозолей. – М.: Изд-во АН СССР, 1961.
5. *Горлин С.М., Слезингер И.И.* Аэромеханические измерения. – М.: Наука, 1964. – 720 с.
6. *Волощук В.М., Скриник О.Я.* Коефіцієнт захвату пластини, нормальної до потоку // Наук. пр. УкрНДГМІ. – 2007. – Вип. 256. – С. 44-52.
7. *Зельманович И.Л., Шифрин К.С.* Таблицы по светорассеянию. Т. III. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 431 с.
8. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986. – 660 с.

*Український науково-дослідний
гідрометеорологічний інститут, Київ
АТ “Мірад”, Київ*

А.А. Алесин, Л.В. Иванченко, А.В. Силаев, Л.М. Товстенко

Применение искусственного тумана для калибрования нефелометрических измерителей видимости

На основе поточной камеры искусственного тумана создана лабораторная установка для калибрования направленных нефелометров в единицах показателя рассеяния света в тестовой среде. Показатель рассеяния вычисляется на основе результатов экспериментального определения микрофизических параметров тумана и теоретически рассчитанных значений факторов эффективности рассеяния для его капель. Нефелометры, прокалиброванные таким методом, пригодны для определения дальности видимости в природных туманах и плотных дымках.

Ключевые слова: дальность видимости, направленный нефелометр, калибрование.

A.A. Alesin, L.V. Ivanchenko, A.V. Sylayev, L.M. Tovstenko

The application of artificial fog for calibration of nephelometric visibility meters

The laboratory setup is created on a basis of the flow fog chamber for calibrating directed nephelometers through a light diffusion index for this test medium. The light diffusion index is calculated from experimental data about fog microphysical parameters and theoretical estimations the efficiency of light scattering for fog droplets. The nephelometers calibrated in such way are suitable for defining the visibility range in natural fogs and dense hazes.

Keywords: visibility range, directed nephelometer, calibration.