

**ОСОБЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ СВІТЛОВИХ ТА ІНФРАЧЕРВОНИХ СИГНАЛІВ
АЕРОДРОМНИХ ПРОЖЕКТОРІВ**

Вдосконалення світлосигнальних систем аеродромів на основі розширення та комплексування робочих каналів – шлях до розробки всепогодного, цілодобово працюючого аеронавігаційного обладнання, збільшення інформативного забезпечення екіпажу повітряного судна в умовах поганої видимості. На сьогодні запропоновано ряд технічних рішень по встановленню на злітній смузі додаткових сигнальних прожекторів всенаправленого видимого та інфрачервоного (ІЧ) випромінювання.

Метою роботи є теоретичний аналіз щодо особливостей поширення світлових сигналів та сигналів ІЧ-діапазонів з довжинами хвиль $\lambda = 1$ мкм. та $\lambda = 10$ мкм. через атмосферне водно-аерозольне середовище з метою оцінки переваг по дальності виявлення довгохвильового випромінювання в умовах поганої видимості. В роботі проаналізовано умови застосування закону Алларда для точкових джерел в інтегральній формі у видимому діапазоні спектру хвиль, вказано на можливі причини його порушення. Спираючись на теорію аномальної дифракції Ван де Хюлста, одержано математичні вирази для фактора ефективності розсіювання та показника розсіювання, усереднених по світловому – видимому діапазону хвиль. Показано, що середній по видимому діапазону ефективний переріз розсіювання у водному аерозолі з радіусом частинок ≥ 1 мкм. визначається площею геометричного перерізу частинки і не залежить від довжини хвилі. Проаналізовано відношення середніх довжин вільного пробігу фотонів монохроматичного ІЧ-випромінювання до аналогічної величини фотонів світлового діапазону. Встановлено, що перевага по дальності виявлення монохроматичного випромінювання ІЧ-діапазону над світловим обмежується певною величиною водно-аерозольних частинок.

Показано, що заданій метеорологічній дальності видимості S_M можуть відповідати різні комбінації структурних параметрів аерозолі: концентрації частинок та їх радіусів. Від їх комбінації залежить співвідношення дальностей виявлення на різних робочих довжинах хвиль видимого та інфрачервоних випромінювань аеродромних прожекторів. Так, при $S_M = \text{Const}$ можливий двоякий результат: довгохвильове ІЧ-випромінювання може мати більшу дальність виявлення ніж видиме, а при деяких співвідношеннях концентрації та розмірів частинок її не перевищувати. Внаслідок цього міжнародна 10-бальна шкала метеорологічної дальності видимості не може бути орієнтиром щодо вибору ефективної робочої довжини хвилі аеродромних прожекторних сигналів по дальності виявлення. «Електронний зір» матиме більшу дальність виявлення ніж візуальний при такій структурі водного аерозолі, коли радіус частинок менший за критичний для даної робочої довжини хвилі. Системи аеродромних сигнальних прожекторів ІЧ-діапазону будуть найбільш ефективними в умовах погіршеної візуальної видимості за умови можливості роботи на кількох ІЧ-діапазонах довжин хвиль.

Ключові слова: дальність видимості, метеорологічна дальність видимості, інфрачервоні промені, світло.

Вступ. Етапи зниження повітряного судна (ПС), вихід на посадкову пряму та завершення посадки екіпаж ПС виконує при наявності візуальної інформації про обстановку на злітно-посадковій смузі (ЗПС). Існуючі системи навігації, наприклад, GPS, забезпечуючи високу точність визначення координат ПС, принципово не можуть здійснити візуальний контакт екіпажу ПС з ЗПС. З високою якістю це може забезпечити бортова система, що працює в кількох діапазонах інфрачервоних (ІЧ) електромагнітних хвиль (ЕМХ) з наступним синтезом інформації та виводом на єдиний монітор візуалізації. В умовах обмеженої видимості комплексування робочих каналів є важливою складовою електронного візуального польоту з наступним переходом на дійсно візуальний. За великих швидкостей ПС виявлення світлових та ІЧ-променевих орієнтирів ЗПС значно раніше висоти прийняття рішення дає більше часу

екіпажу для адекватної оцінки обстановки, підвищує надійність та безпеку польоту.

Аналіз публікацій. Поняття видимості та її характеристики – дальності пов'язане з природним візуальним сприйняттям навколишнього простору для середньостатистичного ока [1, 2]. В авіації розрізняють видимість, пов'язану з розрізненням та впізнаваністю чорного об'єкту на світлому фоні неба, а також з розрізненням та впізнаваністю вогнів на неосвітленому фоні [3]. Важливими для екіпажу ПС є горизонтальна, вертикальна та похила польотні видимості, дальність видимості на ЗПС, дальність втрати візуального контакту. З використанням в світлосигнальному обладнанні оптико-електронних пристроїв (ОЕП) актуальним стає поняття дальності виявлення сигналу як максимальної відстані, на якій за допомогою візуальних та технічних засобів спостереження можна виявити об'єкт або випромінювання радіоелектронної апаратури. Вводиться в розгляд дальність дії ОЕП – найбільша відстань до джерела випромінювання, при якій величина енергетичного потоку достатня для одержання на виході приймача сигналу, що в задане число раз перевищує рівень шумів. Основною складністю розвитку ОЕП є питання ідентифікації випромінювачів у пасивному режимі роботи. Здебільшого це стосується тепловізійної техніки. Поєднання активних джерел випромінювання з перевагами використання інфрачервоного (ІЧ) діапазону хвиль може закрити цю проблему, збільшивши в багато разів дальність виявлення сигналів.

Вимоги до вузлів ОЕП формуються, виходячи зі специфіки взаємодії випромінювання і середовища, критеріїв щодо дальності видимості та перешкодозахищеності. Реальна атмосфера – це середовище оптичного каналу, де разом з сумішами газів присутні пари, краплі рідин, пил, дим і т. ін., де послаблюється корисний сигнал за рахунок поглинання та різних механізмів розсіювання. Тому, щоб уникнути поглинання, вибір робочої довжини хвиль ОЕП узгоджують з «вікнами прозорості» атмосфери. Найчастіше погіршення видимості пов'язане з наявністю в атмосфері різних видів аерозолів: серпанків, туману, хмар, осадів. Вплив аерозольних частинок на проходження випромінювання настільки значний у видимій області спектру, що різко зменшує дальність візуальної видимості. В таких випадках на допомогу приходять синтетичний зір, у зв'язку з чим існує поняття електронного візуального бачення та електронного візуального польоту. Принципово в цьому напрямку є значні досягнення. Було запропоновано комплексну навігаційну систему для літальних апаратів, де візуалізація ЗПС електронними засобами відбувається на фоні сітки координатних ліній, що на початковій стадії зниження ПС в умовах відсутності оптичної видимості означає, практично, перехід на візуальний політ, де телевізійна камера і бортовий авіакомп'ютер забезпечують виявлення світлових орієнтирів ЗПС значно раніше висоти прийняття рішення [4]. Існуючі навігаційні системи використовують радіолокаційні сигнали міліметрового діапазону від встановлених по периметру ЗПС активних та пасивних джерел (маркерів), а також додатково приймають від точкових маркерів теплові сигнали, формують синтезовані цифрові зображення сукупності орієнтирів [5, 6]. Технічно результат зміни сумарного зображення на дисплеї обстановки на ЗПС в реальному часі досягається мікшуванням сигналів з трьох каналів ЕМХ та швидкістю цифрової обробки. В запропонованих системах світлове сигнальне обладнання може бути виконане на високому технологічному рівні. При русі ПС на глісаді використовується випромінювання основних маркерів, а при русі на етапі вирівнювання – випромінювання додаткових. Проте, в якості маркерів інфрачервоного (ІЧ) діапазону пропонуються до використання лампи розжарювання. Досягнення LED-технологій в одержанні потужних діодних ІЧ-випромінювачів відкривають широкі можливості в поліпшенні параметрів систем автоматичної посадки літальних апаратів за рахунок більшої енергоефективності діодів у порівнянні з лампами розжарювання [7].

Результат взаємодії аерозольних частинок з випромінюванням залежить від структури і форми частинки, від комплексного показника заломлення речовини частинки, параметра дифракції. Теорія розсіювання Г. Мі на сферичних частинках дозволяє чисельно моделювати різні види кліматичних аерозолів і характер поширення в них електромагнітних хвиль [8]. При виборі робочих ЕМХ необхідно враховувати параметри можливих аерозолів: водні частинки серпанку мають радіуси від 0,5 до 1 мкм., частинки туману – (5 ÷ 6) мкм. В умовах серпанку

світло розсіюється значно сильніше ніж ІЧ-промені.

Запропоновані світлові маркери спостерігаються так, що їх кутові розміри стають меншими порогу гостроти зору і дальність їх видимості описується формулою Алларда, представленою через інтегральні по спектру величини [9, 10]. З тієї формули випливає, що дальність виявлення сигналу залежить лише від сили випромінювання джерела та метеорологічної дальності видимості. Але загалом відомо, що дальність поширення ЕМХ в мутних середовищах, якими є атмосферні аерозолі, значною мірою визначається спектральним складом випромінювання. Більше того, відсутність в розрахункових формулах мікроструктурних параметрів аерозолів обмежує можливості інтерпретації багатьох експериментальних результатів. Наприклад, в роботах [11, 12] зроблено висновок про непрацездатність активно-імпульсних систем в умовах задимленості на традиційних ділянках спектру (0,4 – 0,9 мкм.), в той час, коли в роботах [13, 14] зроблено протилежний висновок.

Метою роботи є теоретичний аналіз щодо особливостей поширення світлових сигналів та сигналів ІЧ-діапазонів з довжинами хвиль $\lambda = 1$ мкм. та $\lambda = 10$ мкм. через атмосферне водно-аерозольне середовище з метою оцінки переваг по дальності виявлення довгохвильового випромінювання в умовах поганої видимості.

Виклад основного матеріалу. В ослабленні випромінювання потрібно враховувати, що закон Бугера-Ламберта, який є складовою частиною формули Алларда, справедливий лише для монохроматичного випромінювання і для видимого діапазону ЕМХ класичний його запис в інтегральних величинах є наближеним, а в деяких випадках взагалі неприйнятний. Основними причинами його порушення є:

1. Селективність пропускання ЕМХ середовищем (атмосферою), наслідком якої є експоненційний характер ослаблення за рахунок розсіювання монохроматичного променевого потоку подібно до закону Бугера-Ламберта.

2. Багатократне розсіювання ЕМХ, яке точно враховується лише в інтегродиференційному рівнянні переносу променевої енергії.

При роботі у «вікнах прозорості» атмосфери можна тією чи іншою мірою нехтувати поглинанням, розглядаючи тільки процес розсіювання ЕМХ, який є також спектрально залежним. Виходячи з цього, для точкового джерела світла можна записати:

$$E_{пор.} = \frac{k_m}{x_m^2} \int_0^{\infty} I(\lambda) e^{-\alpha(\lambda) \cdot x_m} \cdot V(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

де $k_m = 683$ Лм/Вт – максимальна світлова ефективність випромінювання;

$V(\lambda)$ – відносна спектральна чутливість ока;

$\alpha(\lambda) = N \cdot \pi \int_0^{\infty} r^2 K(\lambda, r) f(r) dr$ – об'ємний показник розсіювання;

λ – довжина ЕМХ;

$I(\lambda)$ – спектральна щільність сили світла джерела;

$K(\lambda, r)$ – фактор ефективності розсіювання світла [15 – 17];

$f(r)$ – щільність ймовірності розподілу сферичних частинок аерозолі по радіусах r ;

$E_{пор.}$ – порогова освітленість;

x_m – максимальна відстань, з якої видно джерело світла.

Перехід у співвідношенні (1) до світлових інтегральних по спектру величин реалізуємо введенням середнього по світловому діапазону показника ослаблення світла $\bar{\alpha}$:

$$\bar{\alpha} = (\lambda_2 - \lambda_1)^{-1} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \alpha(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

де $\lambda_1 = 0,4$ мкм., $\lambda_2 = 0,76$ мкм.

Тоді вираз (1) набуде класичного вигляду закону Алларда:

$$E_{пор.} \cong \frac{e^{-\bar{\alpha} \cdot x_m}}{x_m^2} \cdot I, \quad (3)$$

$$\text{де } I = k_m \int_0^{\infty} I(\lambda) V(\lambda) d\lambda.$$

Оскільки, у видимому діапазоні ЕМХ поглинанням на водяних краплях можна знехтувати, показник ослаблення $\bar{\alpha}$ визначається лише величиною розсіювання. В якості одновимірного розподілу випадкової величини r візьмемо найпростіший – вироджений (причинний) розподіл, тобто $f(r) = \delta(r - r_0)$ ($\delta(r)$ – символічна дельта-функція Дірака). Згідно теорії аномальної дифракції Ван де Хюлста, впливає, що для «м'яких» частинок, якими можна вважати водяні краплі, фактор ефективності розсіювання $K_p(\lambda, r)$ має вигляд [16, 17]:

$$K_p(\lambda, r) = 2 - \lambda \cdot \frac{4 \cdot \sin \frac{ar}{\lambda}}{ar} + \frac{\lambda^2 \cdot 4 \left(1 - \cos \frac{ar}{\lambda}\right)}{(ar)^2}, \quad (4)$$

де $a = 4\pi(n - 1)$;

n – дійсна частина комплексного показника заломлення.

Тоді вираз (2) матиме вигляд:

$$\bar{\alpha}(r_0) = \frac{N\pi}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_0^{\lambda_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r^2 K_p(\lambda, r) \cdot \delta(r - r_0) d\lambda dr = N\pi r_0^2 \bar{K}_p(r_0), \quad (5)$$

де

$$\begin{aligned} \bar{K}_p(r_0) = 2 + \frac{C}{(a \cdot r_0)^2} \cdot \left[\lambda_2^3 \left(1 - \cos \frac{ar_0}{\lambda_2}\right) - \lambda_1^3 \left(1 - \cos \frac{ar_0}{\lambda_1}\right) \right] - C \cdot \left[\frac{1}{ar_0} \left(\lambda_2^2 \cdot \sin \frac{ar_0}{\lambda_2} - \lambda_1^2 \cdot \sin \frac{ar_0}{\lambda_1} \right) + \right. \\ \left. + ar_0 \left(si \frac{ar_0}{\lambda_2} - si \frac{ar_0}{\lambda_1} \right) + \lambda_2 \cdot \cos \frac{ar_0}{\lambda_2} - \lambda_1 \cos \frac{ar_0}{\lambda_1} \right]; \quad (6) \end{aligned}$$

$$C = \frac{4}{3 \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)};$$

$$si(x) = \int_0^x \frac{\sin t}{t} dt.$$

Для одержання простішої розрахункової формули при $\frac{a \cdot r_0}{\lambda} \gg 1$, що відповідає $r_0 \gg 0,183$ мкм., використаємо асимптотику інтегрального синуса в першому наближенні:

$si(x) \approx -\frac{\cos x}{x}$. Маємо:

$$\bar{K}_{poz}(r_0) \approx 2 + C \cdot (ar_0)^{-2} \cdot \left[ar_0 \left(\lambda_1^2 \sin \frac{ar_0}{\lambda_2} - \lambda_2^2 \cdot \sin \frac{ar_0}{\lambda_2} \right) + \lambda_2^3 \left(1 - \cos \frac{ar_0}{\lambda_2}\right) - \lambda_1^3 \left(1 - \cos \frac{ar_0}{\lambda_1}\right) \right]. \quad (7)$$

У статистичній фізиці поширення фотонів у середовищі з показником ослаблення α характеризують середньою довжиною вільного пробігу фотона l до моменту його розсіювання або поглинання:

$$l = \alpha \int_0^{\infty} x e^{-\alpha x} dx = \alpha^{-1}. \quad (8)$$

Тоді маємо: $l_\lambda = 1/\alpha(\lambda)$ – довжина вільного пробігу монохроматичного фотона з довжиною хвилі λ і $l_0 = 1/\bar{\alpha}$ – довжина вільного пробігу «середнього» фотона видимого діапазону ЕМХ. Відношення цих величин l_λ/l_0 характеризує ефективність пропускання атмосферою монохроматичного випромінювання в порівнянні з пропусканням ЕМХ видимого діапазону (рис. 1а). Одержимо:

$$\frac{l_\lambda}{l_0} = \frac{\bar{\alpha}(r_0)}{\alpha_\lambda(r_0)} = \frac{\bar{K}_p(r_0)}{K_\lambda(r_0)}. \quad (9)$$

На рис. 1(б), узгодженим з рис. 1(а), представлено можливі співвідношення між концентрацією аерозольних частинок N та їх радіусом r_0 при незмінній метеорологічній дальності $S_M = \text{Const}$, які впливають з формули $\bar{\alpha} = 3,91/S_M$ [10].

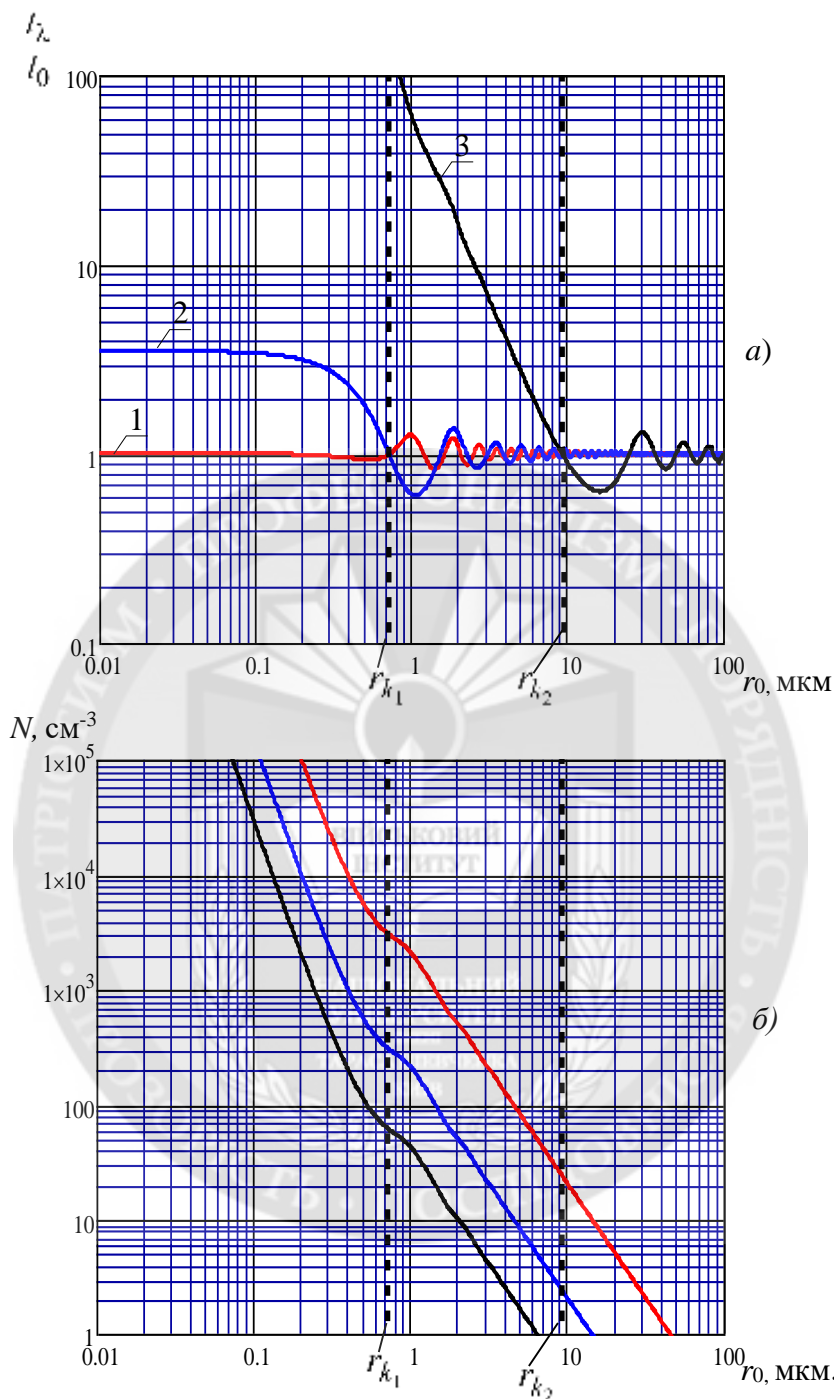


Рис. 1. а) Залежність відношення середньої довжини вільного пробігу фотона з $\lambda = 0,554$ мкм. (крива 1), $\lambda = 1$ мкм. (крива 2), $\lambda = 10$ мкм. (крива 3), до середньої довжини вільного пробігу «світлового» фотона від радіуса водної частинки аерозолю;

б) Можливі співвідношення між концентрацією аерозольних водних частинок та їх радіусом при заданій метеорологічній дальності видимості S_M : 1 - $S_M = 300$ м; 2 - $S_M = 3 \cdot 10^3$ м; 3 - $S_M = 15 \cdot 10^3$ м; r_{k_1}, r_{k_2} - критичні радіуси частинок для $\lambda_1 = 1$ мкм.

Отже, при одному й тому ж значенні S_M може бути нескінченна кількість співвідношень між N і r_0 . Це по різному впливає на дальність дії монохроматичного випромінювання. Існує

критичний радіус частинок r_k , що ділить всі результати дальності на дві частини: $r_0 < r_k$ та $r_0 > r_k$. На першій ділянці при заданій S_M всі співвідношення між N і r такі, при яких $l_\lambda > l_0$. На другій ділянці дальність дії монохроматичного сигналу та світлового, практично однакова. Тобто, якщо $S_M = 100$ м та візуально не видно світла прожекторів, які знаходяться на відстані більшій за 100 м, то при характеристиках аерозолу з області $r_0 < r_k$ більш довгі хвилі будуть досягати приймача. Якщо частинки аерозолу з області $r_0 > r_k$, – ні світловий, ні довгохвильовий сигнали не досягнуть приймача. Очевидно, якісно така ситуація мала місце в експериментах [10 - 14].

В табл. 1, як приклад, представлено можливі параметри водного аерозолу при заданій метеорологічній дальності видимості $S_M = 3 \cdot 10^3$ м, яка класифікується за міжнародною шкалою балом 5. Довжина вільного пробігу «середнього» фотона видимого діапазону становить 767 м. Для порівняння наведено довжину вільного пробігу фотона з $\lambda = 10$ мкм.

Таблиця 1

Можливі співвідношення між концентрацією аерозольних водних сферичних частинок N та їх радіусом r при метеорологічній дальності видимості $S_M = 3 \cdot 10^3$ м

r , мкм.	0,2	0,3	0,4	0,5	0,72	0,85	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0	7,0	9,3	10	15
N , см ⁻³	10440	2490	1008	567	305	261	214	91	51	22	8	≥ 4	≤ 3	~ 2	1
l ($\lambda = 10$ мкм.), м	$602,0 \cdot 10^3$	$500,0 \cdot 10^3$	$390,8 \cdot 10^3$	$284,7 \cdot 10^3$	$123,2 \cdot 10^3$	$74,1 \cdot 10^3$	$47,3 \cdot 10^3$	$22,1 \cdot 10^3$	$12,5 \cdot 10^3$	$5,8 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^3$	767,3	695,8	451,7

На основі даних табл. 1 можна зробити висновок, що вільний пробіг фотона видимого діапазону ЕМХ є практично незмінним і ним визначається метеорологічна дальність видимості $S_M = 3,91 \cdot l_0$, в той час, коли l_λ в широких межах залежить від розмірів частинок. Дані табл. 1 свідчать, що в області $r_0 < 9,3$ мкм. дальність поширення ЕМХ з $\lambda = 10$ мкм. переважає дальність дії світлових променів і змінюється від $1,2 \cdot 10^3$ м до $602 \cdot 10^3$ м. При $r_0 > r_{k_2} = 9,3$ мкм. така перевага зникає. Це означає, що при незмінній величині метеорологічної дальності видимості може реалізовуватись двоякий результат «бачення» з використанням приймачів ІЧ-сигналу, наприклад, тепловізорів:

1) на певній відстані від теплового джерела світла спостерігач візуально його не бачить, але за допомогою тепловізора (або іншого приймача ІЧ-сигналу) довгохвильовий сигнал від джерела є «видимим». Це область параметрів $r_0 < r_k$;

2) як візуально, так і за допомогою ІЧ-приймача, теплове джерело світла невидиме. Це область $r_0 > r_k$. Звичайно, що дальність дії ОЕП залежить також від чутливості фотоприймача, але бачимо, що прозорість середовища – впливовий чинник. Так, коефіцієнт прозорості атмосфери на горизонтальній трасі в 3000 м, при вказаних вище умовах, приблизно у 50 разів більший для електромагнітного сигналу на довжині хвилі 10 мкм. ніж для світлового сигналу.

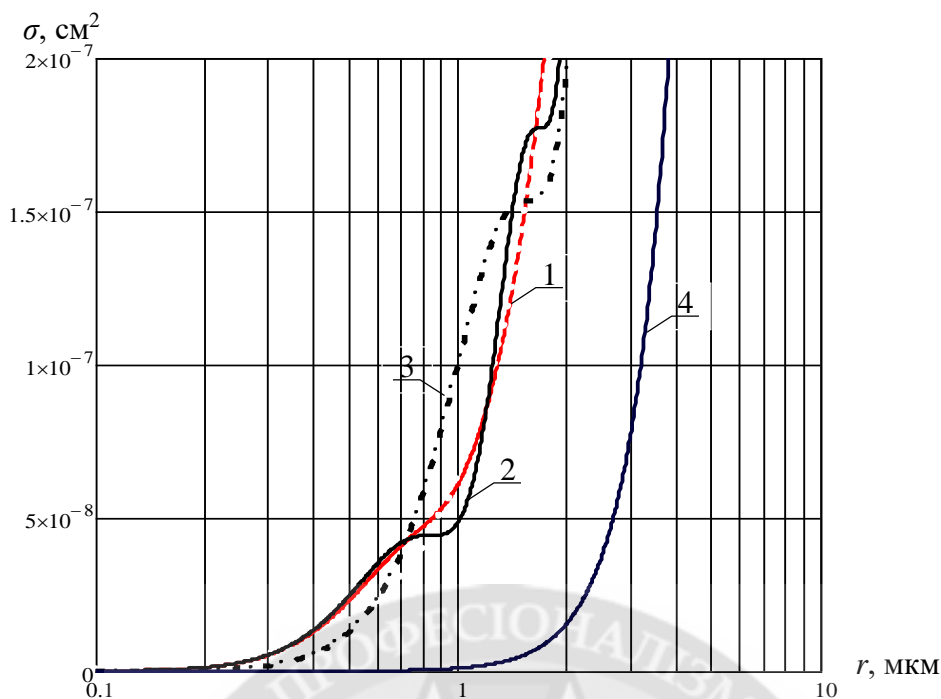


Рис. 2. Залежність перерізу розсіювання водних частинок аерозолю від їх радіуса для ЕМХ різної довжини λ :

1 – світло; 2 – $\lambda = 0,554$ мкм.; 3 – $\lambda = 1$ мкм.; 4 – $\lambda = 10$ мкм

З рис. 2 видно, що середній по світловому діапазону ефективний переріз розсіювання, починаючи з $r \sim 1$ мкм., виходить на величину $2\pi r^2$ і не залежить від λ в той час, коли для довших хвиль такі показники з'являються при значно більших радіусах.

Висновки

1. Для світла та ІЧ-монохроматичного випромінювання існує критичний радіус водяних частинок r_k , при якому дальність поширення світла і даного ІЧ-випромінювання стає приблизно однакою. Радіус r_k визначається робочою довжиною ЕМХ.

2. При фіксованій величині метеорологічної дальності видимості природно реалізуються різні умови спостереження, при яких перевага за дальністю ІЧ-хвиль над світлом існує або відсутня.

3. Величина метеорологічної дальності видимості S_m не може бути критерієм вибору робочої довжини хвилі ЕОП для отримання максимальної дальності дії.

4. Мінімальний радіус сферичних водно-аерозольних частинок, при якому показник розсіювання світла визначається лише їх площею геометричного перерізу і не залежить від співвідношення довжини ЕМХ та розміру частинки, становить ~ 1 мкм.

5. Коефіцієнт прозорості атмосфери на горизонтальній трасі з фіксованою метеорологічною дальністю видимості для сигналів від ІЧ-прожекторів може перевищувати в багато разів аналогічний коефіцієнт для сигналів від світлових прожекторів. Ступінь перевищення залежить від співвідношення концентрації та розміру частинок аерозолю.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Никулин А. Н. Теоретические основы дальности видимости объекта в атмосфере / А. Н. Никулин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010 г. – № 2. – С. 165 – 169.

2. Ермаков С. В. Особенности определения фактической дальности видимости огней маяков по указанной на карте величине / С. В. Ермаков // Вестник государственного морского и речного флота им. С. А. Макарова. – Вып. № 5 (33). – 2015 г. – С. 73 – 78.

3. Руководство по практике наблюдения за дальностью видимости на ВПП и передачи сообщений о ней // Международная организация гражданской авиации – [изд.3-е]. – 2005 г. – Глава 6-с(6.1 – 6.14).

4. Saf'jan D. A. Saf'jan A. D. Complex navigational system for flying vehicles of various classes. Russian Agency for patents and trademarks / Патент на винахід RU 2182313 C2 від 10.05.2002 р.

5. Nikolaev L. E. Aircraft landing method. Russian Agency for patents and trademarks / Патент на винахід RU 2055785 C1 від 10.03.1996 р.
6. Saf'jan D. A. Saf'jan A. D. TV system for taxing, taking off and landing aircrafts at complicated meteorological conditions. Russian Agency for patents and trademarks / Патент на винахід RU 2019472 C1 від 15.09.1994 р.
7. Головенський В. В. Оцінка ефективності ламп розжарювання і напівпровідникових діодів як джерел селективного інфрачервоного випромінювання / В. В. Головенський, С. М. Неділько, О. В. Сілуков // Спеціальна техніка. – 2018. – № 2. (в друці)
8. Mie G., *Annalen der Rhsik*, vol. 25, pp. 377-445, 1908.
9. Allard M. E. Memoire sur intensite et la portee phares. Paris. Annales des ponts et chaussees. 1876. 4 Semestre
10. Фрид Ю. В. Электросветосигнальное оборудование аэродромов / Ю. В. Фрид, Ю. К. Величко [и др.]. – М.: Транспорт, 1998. – 318 с.
11. Волков В. Г. Активно-импульсные ПНВ и тепловизионные приборы. Анализ возможностей применения / В. Г. Волков // Фотоника. – 2007. – № 4. – С. 24 – 28.
12. Кирпиченко Ю. Р. Видеоинформационные системы наблюдения и контроля при сложных условиях видимости / Ю. Р. Кирпиченко, М. И. Курячий, И. А. Пустныский // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 2 (26). – С. 105 – 110.
13. Дегтярев П. А. Исследование и разработка устройств получения видеосигнала в активно-импульсной телевизионной наблюдения : дис. канд. техн. наук : 05.12.04. / Дегтярев Павел Алексеевич – Томск, 2005. – 233 с.
14. Оптико-электронная система для улучшения видимости при задымленности / [А.В. Суриков, Н.С. Летенок, Б.Ф. Кунцевич, В.А. Горобец] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – № 2 (20). – 2014. – С. 4 – 12.
15. Шифрин КО. Рассеяние света в мутной среде / К.О. Шифрин. – М. : Государственное изд-во технико-теоретической литературы, 1951. – 288 с.
16. Грин Х. Р. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы / Х.Р. Грин, Н. В. Лейн. – Ленинград : Химия, 1969. – 428 с.
17. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. – М. : Мир, 1971. – 301 с.

REFERENCES:

1. Nikulin A. N. (2010), “Theoretical basis of the range of visibility of an object in the atmosphere”, *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. [Scientific problems of transport in Siberia and the Far East]*, vol. 2, pp. 165 – 169
2. Ermakov, S. V. (2015), “Features of determining the actual range of visibility of the beacon lights according to the value indicated on the map”, *Vestnik gosudarstvennogo morskogo i rechnogo flota im. S. A. Makarova, [Bulletin of the State Marine and River Fleet. S.A. Makarova]*, vol. 5 (33). pp. 73 – 78
3. “Rukovodstvo po praktike nabljudenija za dal'nost'ju vidimosti na VPP i peredachi soobshhenij o nej”, (2005) *Mezhdunarodnaja organizacija grazhdanskoj aviacii – [izd.3-e]*. vol. 6-s (6.1 – 6.14).
4. Saf'janD. A. Saf'janA. D. Complex navigational system for flying vehicles of various classes. Russian Agency for patents and trademarks / Patent na vynakhid RU 2182313S2 vid 10.05.2002 r.
5. Nikolaev L. E. Aircraft landing method. Russian Agency for patents and trademarks / Patent na vynakhid RU 2055785S1 vid 10.03.1996 r.
6. Saf'janD. A. Saf'janA. D. TV system for taxing, taking off and landing aircrafts at complicated meteorological conditions. Russian Agency for patents and trademarks / Patent na vynakhid RU 2019472S1 vid 15.09.1994 r.
7. Holovenskyi, V. V. (2018) “Estimation of the efficiency of incandescent lamps and semiconductor diodes as sources of selective infrared radiation”, *Spetsialna tekhnika [Special Technique]*, no 2. (v drutsi)
8. Mie, G. (1908), “Annalen derRhsik”, vol. 25, pp. 377-445
9. Allard M.E. (1876), “Memoire sur intensite et la portee phares. Paris. Annales des ponts et chaussees”. 4 Semestre
10. Frid, Ju. V. & Velichko Ju. K. (1998), “Aerial light signaling equipment”, Moscow: Transport, 318p.
11. Volkov, V. G. (2007), “Active-impulse PNV and thermal imaging devices. Analysis of application possibilities” *Fotonika [Photonics]*, no 4, pp. 24 – 28.
12. Kirpichenko Ju. R., Kurjachij, M. I. & Pustnyskij, I. A. (2012) “Video information systems for

monitoring and control under difficult visibility conditions”, *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravljenja i radioelektroniki*, no. 2 (26), pp. 105 – 110.

13. Degtjarev, P. A. (2005) “Research and development of video signal acquisition devices in active-impulse television observation” dis. kand. tehn. nauk: 05.12.04. / Degtjarev Pavel Alekseevich, Tomsk, 233 p.

14. Surikov, A. V., Letenjuk, N. S., Kuncevich, B. F. & Gorobec, V. A. (2014) “Optoelectronic system for improving visibility in case of smoke”, *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'. [Bulletin of the Command-Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus]*, no. 2 (20), pp. 4 – 12.

15. Shifrin, K. O. (1951) “Scattering of light in a turbid environment”, Moscow, Gosudarstvennoe izdvo tehniko-teoreticheskoy literatury, 288 p.

16. Grin, H. R. & Lejn, N. V. (1969) “Aerosols - dust, fumes and fogs”, Leningrad, Himija, 428 p.

17. Dejmendzhan, D. (1971) “Scattering of electromagnetic radiation by spherical polydisperse particles”, Moscow, Mir, 301 p.

Holovenskiy V.V., Bazyk O.I., Lisovenko V.D.

FEATURES OF DETECTION OF LIGHT AND INFRARED SIGNALS OF AERODROME FLOODLIGHTS

Improvement of aerodrome lighting systems on the basis of expansion and integration of operating channels is the way to the development of all-weather, round-the-clock operating air navigation equipment, increase in the information support of the aircraft crew in conditions of poor visibility. Currently, a number of technical solutions based on the installation on the runway of additional signal floodlights of omnidirectional visible and infrared (IR) radiation have been proposed. However, experimental evidence testifies to insecurity of the identification of electronic visibility in the atmospheric aerosol environment, which requires further research and determination of causes. The purpose of the research paper is a theoretical analysis of the features of the propagation of the light signals of visible range and IR range signals with wavelengths of $\lambda = 1 \mu\text{m}$. and $\lambda = 10 \mu\text{m}$. through atmospheric water-aerosol environment in order to evaluate the advantages on the range of detection of long-wave radiation in conditions of reduced visibility. The conditions of practical application of the Allard's law for point sources in the integral form in visible range of wave spectrum have been analysed and the possible causes of its violation have been indicated in the research paper. Based on Van de Houlst's abnormal diffraction theory, mathematical expressions for the scattering efficiency factor and scattering coefficient, the light – visible wave range-averaged, are obtained. It is shown that the effective scattering cross section in water aerosol with a particle radius $\geq 1 \mu\text{m}$. is determined by the area of the geometric cross section of the particle and does not depend on the wavelength. The ratio of the average lengths of the free path of photons of monochromatic IR radiation to the analogous value of photons of the light range has been analysed. It has been established that the advantage on the range of the monochromatic radiation of IR range over the light one is limited to a certain size of water-aerosol particles.

It is shown that different combination of aerosol structural parameters: particle concentration and their radiuses may correspond to the set meteorological range of visibility S_M . The ratio of the range of detection on the various operating frequencies of visible and infrared radiation of the aerodrome floodlights depends on their combination. Thus, at $S_M = \text{Const}$, the dual result is possible: long-wave IR radiation may have a greater range of detection than the visible one, and may not exceed it at some ratios of concentration and particle size. Because of this, the international 10-point scale of the meteorological range of visibility can not be a reference point for choosing the effective operating wavelength of aerodrome signals according to the detection range. ‘An electronic vision’ will have a greater range of detection than visual one under such a structure of a water aerosol, when the particle radius is less than critical one for a given operating wavelength. The systems of aerodrome signal floodlights of the IR range will be most effective in conditions of reduced visual visibility, provided there is the possibility of operation on several operating IR ranges of wavelengths.

Keywords: range of visibility, meteorological range of visibility, infrared rays, light.