

УДК 656.71.0579

В.І. Степура, доц.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ВИДИМОСТІ СВІТЛОСИГНАЛЬНИХ ВОГНІВ

Порівняно результати визначення дальності видимості аеродромних вогнів, виконаних за різними математичними моделями.

Проектуванню авіаційних світлотехнічних комплексів та їхніх складових – аеродромних вогнів передують розробка математичної моделі процесу виявлення та розпізнавання світлотехнічних пристроїв, їхнього взаємного просторового розташування.

За даними багатьох експериментів, можливість виявлення світлосигнального пристрою визначається граничною освітленістю на зіниці ока. У зв'язку з тим, що світлосигнальний пристрій спостерігається при постійній зміні відстані між ним і спостерігачем, завдання моделювання полягає у встановленні математичних залежностей, які описують:

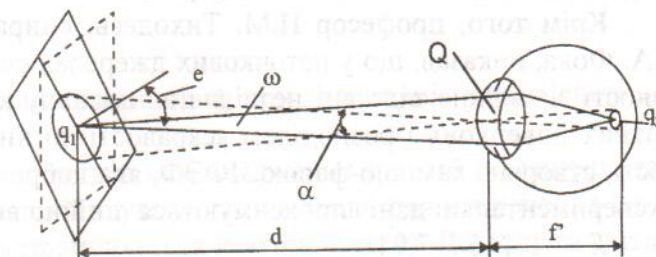
– особливості сприйняття світлосигнального пристрою залежно від зміни його видимого кутового розміру;

– закон поширення випромінюваного світлотехнічним пристроєм у простір світла.

Огляд застосованих методів моделювання зорового сприйняття світлосигнальних пристроїв [1–10] вказує на різні підходи до опису цього процесу. Спираючись на одну й ту саму просторову графічну модель процесу (рис. 1), алгоритми визначення граничної освітленості на зіниці за даними різних авторів значно різняться між собою.

Рис. 1. Схема сприйняття світлотехнічного пристрою оком:

Q – площа зіниці; e – кут між головним напрямком поширення світла вогню і напрямком спостереження; ω – тілесний кут, у якому поширюється світловий потік, що створює зорове відчуття на зіниці ока; q_1 – площа світлового отвору вогню; q_2 – зображення світлового отвору вогню на зіниці; α – видимий оком кутовий розмір світлового отвору вогню; d – відстань між вогнем та спостерігачем; f – задня фокусна відстань ока



При конструюванні авіаційних світлосигнальних пристроїв дальність видимості у переважній більшості випадків [1–4] визначають за законом Аллара:

$$E_{\text{пор}} = \frac{I}{d^2} 10^{-\frac{1,7d}{S_m}} 10^{-6}, \quad (1)$$

де $E_{\text{пор}}$ – порогова освітленість на зіниці ока, лк; I – сила світла світлотехнічного пристрою в напрямку спостереження; d – відстань між спостерігачем та вогнем; S_m – метеорологічна дальність видимості.

Дальність видимості вогню, що має силу світла I , розраховується для випадку, коли освітленість на зіниці від вогню, що спостерігається, дорівнює граничній при заданій яскравості навколишнього фону. Член $10^{-\frac{1,7d}{S_m}} = \tau$ визначає коефіцієнт пропускання шару атмосфери товщиною d між спостерігачем та вогнем.

Розрахунки дальності видимості за формулою (1) виходять тільки з закону квадратів відстаней поширення світла в просторі і не враховують законів формування освітленості на зіниці. У роботах [3; 4] зроблена спроба врахувати оптичні та фізіологічні [4] особливості ока. Зокрема, для об'єктів з великими кутовими розмірами ($\alpha \geq 1' \dots 7'$) яскравість на зіниці не залежить від відстані й визначатиметься лише яскравістю об'єкта L .

Такі міркування виходять із закону квадратів відстаней поширення світла. У зв'язку з тим, що зображення вогню на зіниці ока має кінцеві розміри, створювана таким вогнем освітленість поверхні зіниці спадає пропорційно квадрату відстані. При зміні відстані спостереження в два рази лінійний розмір зображення вогню на зіниці також зменшиться у два рази, але площа його зображення зменшиться в чотири рази. Отже, зменшення світлового потоку, що потрапляє в око від вогню, пропорційне зменшенню площі ділянки зіниці ока, на яку цей потік потрапляє, освітленість зображення залишається постійною і не залежить від відстані до вогню.

Це справедливо лише при відсутності поглинання світла, в іншому випадку створювана вогнем освітленість спадатиме швидше, ніж площа зображення на зіниці. Але якщо розглядати об'єкт з кутовими розмірами, що дорівнюють розмірам дифракційного кружка розсіяння, площа якого завжди постійна і не залежить від відстані до спостерігача, зміна освітленості зіниці вже не компенсується зміною площі зображення і визначається лише законом зміни освітленості від відстані.

Стосовно до фізіологічних властивостей ока в роботі [4] пропонується враховувати різницю між яскравістю об'єкта L і її суб'єктивним світловим відчуттям E' . Залежність між цими величинами досить складна і у першому наближенні можна описати відповідно до психофізичного закону Вебера-Фехтнера, як

$$E' = k \ln L + c,$$

де k і c – деякі константи.

Аналіз описаних у роботах [1–4] моделей показує, що усі вони спираються на закон квадратів відстаней поширення світла від світлового приладу, справедливий для точкового джерела [5; 6]. Але в книзі [6] недвозначно застерігається про обмеженість застосування закону квадратів відстаней для визначення сили світла неточкових джерел і особливо світлооптичних приладів, до яких відносяться світлосигнальні.

Крім того, професор П.М. Тиходеев, спираючись на теоретичні дослідження академіка В.А. Фока, показав, що у неточкових джерелах світла та світлооптичних пристроях зміна освітленості зі зміною відстані не підлягає правилу квадратів відстаней та визначається обрисами світних поверхонь і розподілом яскравості по них [7]. Автором визначена залежність освітленості, створена лампою-фарою ЛФЭФ, яка добре апроксимується лінійною залежністю (рис. 2). Експериментальні дані апроксимуються лінійно виразом

$$E = -0,146 l + 7,94$$

з коефіцієнтом достовірності апроксимації $R^2 = 0,9923$. Для опису безпосереднього сприйняття яскравості об'єктів оком [7] пропонується вираз:

$$E = \tau_1 L \frac{Q}{f'^2} \frac{n_2^2}{n_1^2}, \quad (2)$$

де τ_1 – коефіцієнт пропускання, що враховує втрати світла у середовищах ока (у повітрі не враховуються); L – яскравість об'єкта у напрямі спостереження; Q – площа зіниці ока; f' – фокусна відстань ока; n_1 – показник заломлення повітря; n_2 – показник заломлення склоподібного тіла ока.

Аналіз формули (2) показує, що зорове відчуття визначається яскравістю світної поверхні L , не залежить від відстані до неї, але залежить від розкриття зіниці ока Q . Аналогічний вираз для визначення освітленості зображення на зіниці ока, а також у фокальній площині оптичного приладу з малою передньою апертурою ϵ в роботах [8–10]:

$$E = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \frac{\pi L \tau \left(\frac{D}{f'} \right)^2}{4} \frac{\beta_p^2}{(\beta_p - \beta)^2}, \quad (3)$$

де D – діаметр зіниці ока; β_p – збільшення в зіницях; β – лінійне збільшення.

Особливістю підрахунків за виразом (3) є те, що він дозволяє оцінити яскравість зображення незалежно від кутових розмірів об'єкта. При малих кутових розмірах об'єкта $\beta \rightarrow 0$ вираз (3) перетворюється у рівняння (2).

На рис. 3 подано результат розрахунків порогової освітленості, виконаної за виразами (1) та (3) для одного й того ж самого вогню і однакової прозорості атмосфери. На осі ординат показано відношення порогової освітленості, підрахованої за виразом (3), до порогової освітленості, підрахованої за виразом (1), по осі абсцис – відстань у кілометрах. Значення метеорологічної дальності видимості S_m складало 1 км.

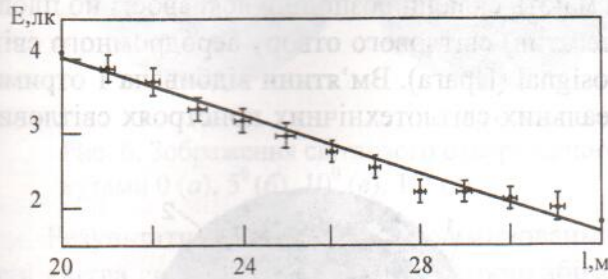


Рис. 2. Залежність освітленості, створена лампою-фарою ЛФЄФ, від відстані

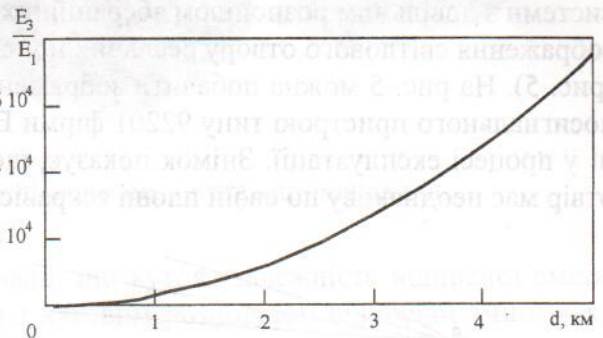


Рис. 3. Результати підрахунку освітленості

Рис. 3 наочно демонструє значне перевищення, вище необхідного, порогової освітленості від світлосигнального пристрою. Використання цього факту дозволило б зменшити силу світла вогнів, а у зв'язку з підвищенням дальності їх видимості зменшити їхню кількість і збільшити відстань між ними. Цей висновок підтверджується тенденціями до змін світлотехнічних параметрів вогнів, що спостерігаються у рекомендаціях ІКАО протягом останніх років. Величина перевищення світлового порогу непостійна і залежить від прозорості атмосфери, бо її вплив на величини E у виразах (1) та (3) різний, але може визначатися в обох випадках однаковим виразом:

$$\tau = \tau_1 10^{-\frac{1.7d}{S_m}} 10^{-6},$$

де τ – коефіцієнт пропускання шару атмосфери товщиною d , при величині метеорологічної дальності видимості S_m .

Виконане натурне моделювання видимості вогнів та дослідження кутової залежності яскравості світлового отвору вогнів дозволило запропонувати таку модель для визначення дальності визначення вогнів. За основу розрахунку пропонується взяти вираз (3). Яскравість світлового отвору необхідно подати так:

$$L' = L(I, P)M(\alpha, \beta),$$

де $L(I, P)$ – деяка функція, яка залежна від сили струму тіла розжарення джерела світла і його потужності і дорівнює максимальній яскравості світлового отвору при фронтальному його спостереженні ($\alpha = 0, \beta = 0$); $M(\alpha, \beta)$ – двовимірний масив коефіцієнтів, величина яких змінюється від 0 до 1 і визначається кутом спостереження вогню по горизонталі α та вертикалі β .

Отже, добуток $L(I, P)$ на один з коефіцієнтів масиву $M(\alpha, \beta)$ дає величину відношення яскравості світлового потоку отвору пучка у даному напрямку до величини максимальної яскравості. Така заміна вимагає подання фотометричних даних світлосигнального пристрою не в координатах VH , а даними відносного кутового розподілу яскравості світлового отвору. Їх можна отримати, використовуючи стандартні фотометричні дані в координатах VH .

Концентрація світлового потоку у світловому пучку приладу визначається яскравістю і розміром зображення джерела світла у світловому отворі світлооптичної системи. Концентрація світлового потоку в різних напрямках усередині світлового пучка світлооптичної системи не залишається однаковою. Вона повною мірою характеризується кривими сил світла, що визначають величину сили світла для різних напрямків усередині світлового пучка приладу.

У світловому отворі світлооптичної системи утворюється збільшене зображення джерела світла. Розмір цього зображення при даному джерелі світла обумовлює силу світла системи. Для однієї і тієї ж самої світлооптичної системи зазначене зображення у загальному випадку

неоднакове для різних напрямків від оптичної осі приладу, тобто при спостереженні світлового отвору з різних напрямків. Кожна точка оптичної системи може бути видна світлою з заданого напрямку у випадку, якщо останнє лежить усередині елементарного відображення, що виходить з цієї точки (рис. 4). Для спостерігача, що перебуває у точці L , точка A на відбивачі буде спостерігатися світлою, а точка B – темною. Крім того, реальні прилади мають абераційні оптичні системи з довільним розподілом абераційних похибок по поверхні системи, і, як наслідок цього, зображення світлового отвору реальних пристроїв мають складні розподіли яскравості по площі (рис. 5). На рис. 5 можна побачити зображення (негатив) світлового отвору аеродромного світлосигнального пристрою типу 92201 фірми Elektrosignal (Прага). Вм'ятини відбивача 1 отримані у процесі експлуатації. Знімок показує, що у реальних світлотехнічних пристроях світловий отвір має неоднакову по своїй площі яскравість.

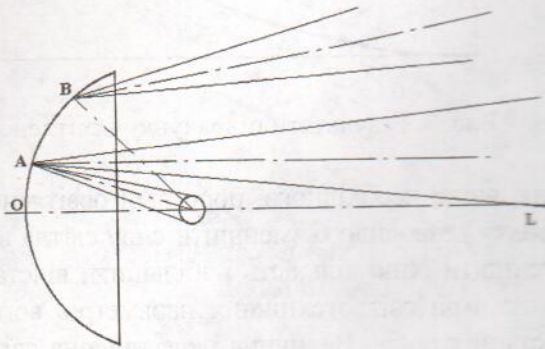


Рис. 4. Виникнення темних і світлих точок у світловому отворі світлооптичної системи

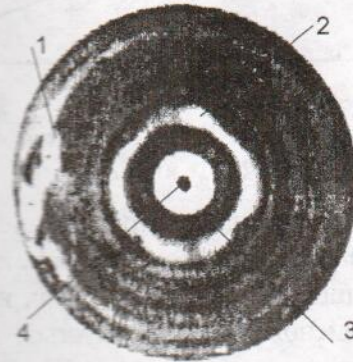


Рис. 5. Світловий отвір аеродромного вогню без розсіювача:

1 – вм'ятини відбивача; 2 – кільцеподібна зона; 3 – задня плоска частина відбивача для встановлення джерела світла; 4 – джерело світла

Яскравість будь-якої точки світлового отвору L_{co} та яскравість відповідної точки джерела світла L_{dc} перебувають у такій залежності:

$$L_{co} = \rho L_{dc},$$

де ρ – коефіцієнт відбивання покриття відбивача.

Сила світла світлотехнічного пристрою буде визначатися виразом:

$$I = kSL_{co},$$

де k – коефіцієнт виходу, що враховує усі втрати світла у світлооптичній системі (відбивання, екранування, втрати у захисному склі тощо); S – площа світлового отвору.

Якщо ж яскравість світлового отвору нерівномірна за площею, то

$$I = \sum I_i = k \sum L_i S_i,$$

де S_i – площа тої частини світлового отвору, для якої відповідна величина L_i може вважатися практично незмінною.

Очевидно, що останній вираз має бути правдивим також і для неосьової сили світла, тільки у цьому випадку потрібно розглядати ту площу світлового отвору, яка спостерігається світлою у даному напрямку. Останнє міркування дозволило експериментально дослідити залежність між силою світла в даному напрямку та яскравістю світлового отвору світлосигнального пристрою у цьому ж напрямку.

На рис. 6 наведені деякі результати проведених досліджень залежності кутового розподілу сили світла та яскравості світлового отвору світлосигнального пристрою. Дослідження були проведені на гоніофотометрі, тільки крім фотоприймача ще використовувалася фотокамера, встановлена так, що вхідний отвір її збігся з вхідним отвором фотоприймача. Виміряна відносна зміна яскравості від кута спостереження відповідала відносній зміні сили світла у цьому ж напрямку.

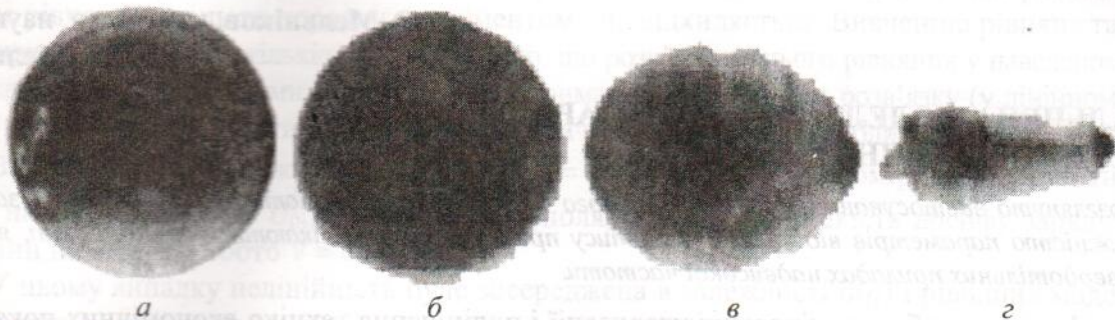


Рис. 6. Зображення світлового отвору одного з досліджуваних вогнів, отриманих під кутами 0° (а), 5° (б), 10° (в), 15° (г)

Результати фотометричних вимірювань показали, що кутова залежність відносної зміни сили світла світлосигнального пристрою збігається з кутовим розподілом відносної зміни яскравості світлового отвору і дозволяє використовувати перші для застосування у підрахунках дальності видимості.

Висновок. Виконані дослідження дозволяють: узгодити рекомендації розробникам світлосигнального обладнання стосовно до методів розрахунку необхідної сили світла вогнів з міжнародними нормативними актами, переглянути діючу нормативно-технічну базу авіаційного світлосигнального обладнання з метою поліпшення методів отримання і зміни форми подання фотометричних даних вогнів.

Список літератури

1. Басов Ю.Г. Светосигнальные устройства. – М.: Транспорт, 1993. – 309 с.
2. Электросветлосигнальное оборудование аэродромов / Ю.В. Фрид, Ю.К. Величко, В.Д. Козлов и др. – М.: Транспорт, 1988. – 318 с.
3. Сенилов Г.Н., Родионов Л.В., Ширшов Л.Г. Расчёт и эксплуатация светотехнических импульсных установок и источников питания. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
4. Забелина А.А. Расчёт видимости звёзд и далёких огней. – Л.: Машиностроение, 1978. – 184 с.
5. Справочная книга по светотехнике. – 2-е изд., перераб. и доп./ Под ред Ю.Б. Айзенберга. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 528 с.
6. Справочная книга по светотехнике. Световые приборы и источники света / Под ред. В.С. Кулебакина. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 470 с.
7. Тиходеев П.М. Световые измерения в светотехнике (фотометрия). – Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 464 с.
8. Апенко М.И., Дубовик А.С. Прикладная оптика. – М.: Наука, 1982. – 352 с.
9. Теория оптических систем / Б.Н. Бегунов, Н.П. Заказов, В.И. Кузечев, С.И. Кирюшин. – М.: Машиностроение, 1981. – 432 с.
10. Справочник конструктора оптико-механических приборов / Под ред. В.А. Панова. – Л.: Машиностроение, 1980. – 742 с.

Стаття надійшла до редакції 30.03.02.