

## ПРИЛАДИ

УДК 535.232

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/04>

**Романюк В.А.**

Національна академія Національної гвардії України

**Стародубцев С.О.**

Національна академія Національної гвардії України

### ОЦІНКА ВПЛИВУ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛУ ОБШИВКИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛАЗЕРНИХ ЗАСОБІВ УРАЖЕННЯ

*Стаття присвячена дослідженню впливу лазерного випромінювання на матеріал обшивки корпусів літальних апаратів і можливістю його застосування як засобу ураження повітряних цілей.*

*Визначено, що традиційні системи озброєнь, які застосовуються при веденні бойових дій, на поточний час все частіше виявляються менш ефективними, особливо в боротьбі з безпілотними літальними об'єктами. Через це фахівці звернули увагу на можливість використання бойових лазерів як засобу ураження. Який же сучасний стан і перспективи створення ефективних зразків лазерної зброї, що використовує як вражаючий засіб потужний промінь проміння, її сильні та слабкі сторони?*

*З урахуванням необхідності протидії новим видам загроз, виникає питання, чи можуть квантово-оптичні засоби замінити традиційні види озброєнь і коли це може статися? Важко сказати. Але, враховуючи, як розвивається цей напрям, можна говорити про реальні досягнення в розробці лазерної зброї.*

*Перевагами лазерної зброї у порівнянні з звичайними зразками озброєння є невеликі витрати для ураження об'єктів, швидкість ураження (зі швидкістю світла), необмежена кількість пострілів, завдяки своїй швидкості та системам спостереження за цілями може вражати багато цілей одночасно, при сприятливих погодних умовах, може досягати дуже великих відстаней. Щодо недоліків даного виду зброї, потребують багато енергії, оскільки засоби виділяють багато тепла під час використання, потрібне додаткове охолодження, стрільба тільки по прямій, сильна залежність від стану атмосфери.*

*Лазерна зброя безпосереднього руйнування дозволяє порушити цілісність конструкції літального апарату, ініціювати його вибух або інтенсивне горіння вибухових або легкозаймистих речовин, що знаходяться на об'єкті. Лазерне випромінювання виробляється в рамках упорядкованого процесу примусової емісії. Лазер випромінює когерентне монохроматичне світло у вигляді паралельного пучка спрямованої енергії, поширюється зі швидкістю світла, що у десятки тисяч разів перевищує швидкість сучасних ракет. Це вказує на те, що альтернативи розвитку бойових лазерів немає.*

**Ключові слова:** лазерна зброя, ураження об'єктів, лазерний промінь.

**Постановка проблеми.** При розробці любого виду зброї, в тому числі і лазерної, основною вимогою до неї є визначення її ефективності. А від того, наскільки вона буде ефективною, буде залежати і питання, чи взагалі є необхідність у створення такої зброї. Коли мова йде про зброю, основою якої є квантово-оптичні засоби (лазери), то під ефективністю розуміють величину енергії, яку може генерувати такий пристрій. А енергія випромінювання безпосередньо впливає на масо-габаритні характеристики (для збільшення енергії випромінювання необхідно потужніший, а зна-

чить і більший накопичувач, активний елемент тощо) [2, с. 2].

Як відомо, при дії лазерного випромінювання великої потужності на матеріали виникає плазмовий шар і фактично необхідно аналізувати взаємодію випромінювання із плазмою, що утворилася на поверхні об'єкта. Падаючий на поверхню матеріалу потік енергії частково відбивається, інша частина потоку, яка проникає в глибоку речовину, поглинається. Це веде до нагрівання й руйнування речовини за рахунок дії ефективного теплового джерела з визначеним просторово – часовим

розподілом [2, с. 5–6]. Дослідження показують [2, с. 11–12], що при заданій формі й тривалості імпульсу існує досить чітко визначена критична щільність потоку випромінювання (яка залежить від теплофізичних характеристик речовини, що опромінюється). При цьому передбачається, що як властивості падаючого потоку лазерного випромінювання, так і теплофізичні характеристики самої речовини відомі. Але часто доводиться вводити потік електромагнітної енергії в середовище при відсутності інформації про її теплофізичні властивості. У цьому випадку неможливо визначити оптимальне введення електромагнітної енергії в речовину, при якій відбувається інтенсивний випар речовини. Звідси й необґрунтовані енергетичні витрати при впливі лазерного випромінювання на речовину і величезні витрати енергії при захисті її від лазерної енергії. Отже, знання теплофізичних характеристик речовини, що взаємодіє з лазерним випромінюванням, є необхідною умовою пропалювання її лазерним променем.

Зі зростанням щільності потоку лазерного випромінювання поверхня металу нагрівається до усе більш високої температури. У результаті починається плавлення й випар металу. При досягненні цієї щільності відбувається інтенсивний випар речовини, котрий призводить, крім плавлення, й до руйнування речовини.

Наявність інформації про теплофізичні характеристики матеріалу обшивки дронів, які використовуються на полі бою, енергетичні характеристики наявних лазерних засобів дає можливість розташовувати їх на оптимальній відстані від лінії бойового зіткнення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанню застосування зброї направленої енергії присвячено досить багато публікацій [1, 2, 4, 5, 6]. До одних з довготривалих розробок щодо знищення крилатих ракет, в тому числі і БПЛА можна віднести лазерну зброю. В якості вражаючого елемента є лазерний промінь. Прототипи лазерної зброї розробляються різними державами і компаніями з 70-80-х років ХХ століття [4, с. 19].

Лазерна антидронна зброя фокусує і стріляє лазерним променем, який знищує безпілотник зсередини, нейтралізуючи його. Лазерна зброя дозволяє порушити конструкцію літального апарату і визвати підірив його паливних баків або речовин, які знаходяться всередині апарату: бойовий заряд, легкозаймисті речовини тощо [2, с. 3]. Такі пристрої розробляють компанії Lockheed Martin та Raytheon. Також відомо про спільні розробки Lockheed Martin і Rafael (Ізраїль). Компа-

нії об'єднали зусилля, щоб створити антидронну оптичну (лазерну) зброю для посилення системи ППО. Лазерна зброя є й у Китаю. Її виготовляє компанія China Space Sanjiang Group [5, с. 2].

Досягнення з розробки лазерної зброї, описані в вищезазначених джерелах, це все лише одиничні зразки. Застосування лазерної зброї в реальних бойових діях поки що ніде не зафіксовано. До прикладу, у Британії планують взяти на озброєння лазерну зброю DragonFire до 2027 року. Ця лазерна зброя була створена для знищення безпілотників, однак, система достатньо потужна, щоб уражати швидші снаряди, наприклад балістичні ракети [6, с. 2].

США – лідер у галузі розробки лазерної зброї. Тут вона розвивається так інтенсивно, як ніде у світі. У 2017 році провідна аерокосмічна та оборонна американська корпорація Lockheed Martin продемонструвала свою лазерну систему ATHENA. Ця переносна наземна система складається з трьох оптоволоконних лазерів потужністю від 10 до 30 кіловат. Її мета – боротьба з малими безпілотниками, у чому вона себе успішно зарекомендувала.

Крім того, армія США у вересні 2023 року також взяла на озброєння систему DE M-SHORAD від компанії Leonardo DRS. Це прототипи ближньої дії, оснащені 50-кіловатними лазерами і встановлені на броньованих машинах Stryker. Крім бойового лазера, включає також радар, систему управління променем і систему наведення [7, с. 9–11].

**Постановка завдання.** Метою роботи є оцінка залежності впливу вражаючого променя лазерних засобів протидії безпілотним літальним апаратам на їх обшивку від теплофізичних властивостей матеріалу, з якого виготовлений корпус дрона, що дає можливість визначити оптимальне місце розташування засобів ураження на полі бою.

**Виклад основного матеріалу.** Більшість застосувань лазерів засновано на тепловій дії світла. Фізична модель впливу лазерного променя проявляється в наступних процесах:

- поглинання лазерного випромінювання;
- нагрівання металу до точки плавлення  $T_{пл}$ ;
- плавлення після поглинання питомої теплоти плавлення  $L_{пл}$ ;
- нагрів до точки випарювання (кипіння)  $T_v = T_b, P = P_{атм}$ ;
- випарювання після поглинання питомої теплоти пароутворення  $L_{вип}$ ;
- рух поверхні, яка випаровується в глибину матеріалу зі швидкістю  $V_0$ ;
- утворення плазми [8, с. 4–5].

Проведемо аналіз динаміки нагрівання речовини лазерним випромінюванням та визначимо основні теплофізичні параметри речовини.

Промінь, який направляється на поверхню дрона, проникає в нього, при цьому частина енергії відбивається, частина поглинається всередину обшивки фюзеляжа дрона. Глибина проникнення залежить від багатьох параметрів: оптичних властивостей матеріалу фюзеляжа, від стану його поверхні, від довжини хвилі, тривалості імпульсу та енергії випромінювання, що супроводжується його нагріванням і частковим випаровуванням.

Таким чином, щоб пропалити обшивку дрона, необхідно забезпечити потужний тепловий вплив лазерного випромінювання на поверхню літального апарату. При цьому необхідно перевищити порогове значення щільності енергії в місці влучення променя на поверхні, за рахунок чого почнеться процес інтенсивного випаровування матеріалу. Глибина проникнення променя в матеріал обшивки збільшується при зменшенні тривалості імпульсу і збільшенні частоти лазерного випромінювання.

Критерій застосування лазерів для пропалювання матеріалу, з якого виготовлена обшивка літального апарату, що здатні нагріти поверхню до заданої температури  $T$ .

Температура поверхні  $T$  залежить від потужності  $P$  лазера, яка поглинається площею  $S$ :  $q=P/S$ , де  $q$  щільність потужності,  $P=W/\tau$ ,  $W$  енергія в імпульсі,  $\tau$  – тривалість імпульсу впливу.

Співвідношення між  $T$  і  $q$  щільністю потужності може бути визначено з рівняння теплопровідності:

$$\frac{dT}{dt} - \alpha \Delta T = \frac{Q(x, y, z, t)}{\rho c} \quad (1)$$

де:

$\Delta$  – оператор Лапласа,  $\Delta = \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2}$ ;

$Q$  – об’ємна щільність світлового потоку, який поглинається;

$a$  – температуропровідність;

$\rho$  – щільність;

$c$  – теплоємність.

Для металів вирішення рівняння (1) для круглого джерела випромінювання – круглої плями з радіусом  $r_0$  буде:

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{\alpha\tau}}{k} \left( \frac{1}{\sqrt{\pi}} - \operatorname{ierfc} \frac{r_0}{2\sqrt{\alpha\tau}} \right) + T_n \quad (2)$$

Для

$$r_0 \gg \sqrt{\alpha\tau}$$

при імпульсному режимі

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{\alpha\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_n \quad (3)$$

Формула (3) дозволяє розрахувати порогову (критичну) щільність потужності  $q^{\text{пор}}$ , необхідну для нагрівання поверхні до заданої температури.

Поглинання на поверхні не розподілене рівномірно, і місця з відносно малим поглинанням чергуються з центрами повного поглинання. Для розвитку випаровування важливі саме такі центри, а не середній по поверхні коефіцієнт поглинання матеріалу. Тепловий вплив лазерного випромінювання краще проявляється в імпульсному режимі роботи квантового генератора. При цьому за час дії імпульсу лазерного променя відбувається викид струменя пари в напрямку, перпендикулярному до площини поверхні об’єкта.

Пороги випарювання для імпульсної дії ( $\text{Вт}/\text{см}^2$ ) представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Тривалість імпульсу	Al	Cu	W	Fe
	$q_b$	$q_b$	$q_b$	$q_b$
$\tau=10^{-3}\text{с}$	$2.4 \cdot 10^{10}$	$2.9 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{10}$	$3.6 \cdot 10^9$
$\tau=10^{-7}\text{с}$	$2.4 \cdot 10^{12}$	$2.4 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{12}$	$3.6 \cdot 10^{11}$

Поглинання речовиною лазерної енергії призводить до збільшення температури речовини на величину  $T(r, z, t)$  [8, с. 5–8].

Уведемо характерні величини, пов’язані з теплофізичними константами середовища  $k_t$ ,  $c$  і  $\rho g$  ( $g = 9,80665 \text{ м/с}$ ):

характерна довжина

$$l_0 = \sqrt[3]{\frac{1(k_t)^2}{g(c\rho)^2}} \quad (4);$$

характерний час

$$t_0 = \sqrt[3]{\frac{k_t}{c\rho g^2}} \quad (5);$$

характерна швидкість

$$v_0 = \frac{l_0}{t_0} = \sqrt[3]{\frac{k_t g}{c\rho}} \quad (6);$$

характерна маса

$$m_0 = \rho l_0^3 = \frac{1}{\rho g} \left( \frac{k_t}{c} \right)^2 \quad (7);$$

характерна енергія

$$\varpi_0 = \frac{m_0 v_0^2}{2} = \frac{1}{2\rho} \left( \frac{k_t}{c} \right)^2 \sqrt[3]{\frac{1}{g} \left( \frac{k_t}{\rho c} \right)^2} \quad (8);$$

характерна температура

$$T_0 = \frac{\varpi_0}{c\rho l_0^3} = \frac{1}{2c} \sqrt[3]{\left( \frac{k_t g}{c\rho} \right)^2} \quad (9).$$

Теплофізичні характеристики  $c$ ,  $\rho$ , і  $k_t$  взято з [9, с. 185–192], а значення введених характерних величин розраховуються за формулами (4–9).

Для металів  $\alpha l_0 \gg 1$ , тому інтеграл

$$I = \int_0^{\infty} d\xi_0 \cdot e^{-\alpha l_0 \xi_0} \cdot e^{-\frac{\xi_0^2}{4(\tau-\tau_0)}}$$

можна обчислити асимптотично  $I \sim \frac{1}{\alpha l_0}$ , тоді для приросту температури в центрі лазерної плями на поверхні досліджуваної речовини, будемо мати

$$T(0, 0, \tau) \approx \frac{I_0 l_0}{2\sqrt{\pi} k_{\tau}} \int_0^{\tau} \frac{d\tau_0}{\sqrt{\tau - \tau_0}} \phi(\tau_0) \left( 1 - e^{-\frac{a_{01}^2}{4(\tau-\tau_0)}} \right). \quad (10)$$

Вираз в круглих дужках рівняння (10) дає внесок в інтеграл або при виключно малих радіусах лазерного пучка, або при великих інтервалах часу, тобто при  $a_{01}^2 \sim 4(\tau - \tau_0)$ , тому

$$T(0, 0, \tau) \cong \frac{I_0 l_0}{2\sqrt{\pi} k_{\tau}} \int_0^{\tau} \frac{d\tau_0}{\sqrt{\tau - \tau_0}} \phi(\tau_0) = \frac{I_0 l_0}{2\sqrt{\pi} k_{\tau}} f(\tau). \quad (11)$$

Вираз (11) використовується для обчислення тимчасової зміни температури досліджуваної речовини на осі лазерного пучка. Отримана інформація важлива для визначення параметрів захисних покриттів, що відбивають або поглинають лазерне випромінювання.

Лазерний «пічок» з гарною для практики точністю можна проксимувати модельною залежністю (12), приведеною на рисунку 1.

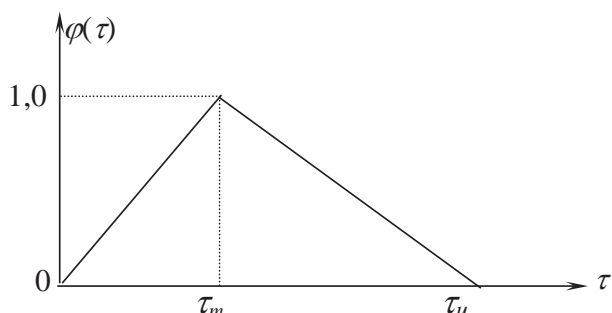


Рис. 1. Модельна залежність лазерного «пічка»

$$\phi(t) = \begin{cases} \frac{1}{\tau_m} \tau; & 0 \leq \tau \leq \tau_m; \\ \frac{\tau_u - \tau}{\tau_u - \tau_m}; & \tau_m \leq \tau \leq \tau_u; \\ 0; & \tau \geq \tau_u. \end{cases} \quad (12)$$

У цьому випадку

$$f(\tau) = \int_0^{\tau} \frac{dx \phi(x)}{\sqrt{\tau-x}} = \frac{4}{3} \int_0^{\tau} (\tau-x)^{\frac{3}{2}} \phi'(x) dx = \frac{4}{3} \begin{cases} \frac{\tau^{\frac{3}{2}}}{\tau_m}, & 0 \leq \tau \leq \tau_m; \\ \frac{\tau^{\frac{3}{2}}}{\tau_m} - \frac{\tau_u}{\tau_m} \frac{(\tau - \tau_m)^{\frac{3}{2}}}{\tau - \tau_m}, & \tau_m \leq \tau \leq \tau_u; \\ \frac{\tau^{\frac{3}{2}}}{\tau_m} - \frac{\tau_u}{\tau_m} \frac{(\tau - \tau_u)^{\frac{3}{2}}}{\tau - \tau_u} + \frac{(\tau - \tau_m)^{\frac{3}{2}}}{\tau - \tau_m}, & \tau \geq \tau_u \end{cases} \quad (13)$$

З виразу (13) видно, що  $f(\infty) = 0$ , як і слід було очікувати. Максимальна температура досягається

при  $\tau = \tau_0$ , причому  $\tau_m < \tau_0 < \tau_u$ . Аналіз виразу (13) показує, що

$$\tau_0 = \frac{\beta^2}{\beta^2 - 1} \tau_m, \quad (14)$$

де  $\beta = \frac{\tau_u}{\tau_u - \tau_m}$  ( $\beta \in [1, \infty)$ ).

При цьому відносно запізнювання максимуму температури відносно максимуму лазерного «пічка» дорівнює:

$$\delta\tau \stackrel{def}{=} \frac{\tau_0 - \tau_m}{\tau_u} \cong \frac{1}{\beta(\beta + 1)} \quad (15)$$

Свого максимального значення  $\delta\tau$  досягає при імпульсу, у якого  $\beta = 1$  ( $\tau_m = 0$ ) при цьому  $\delta\tau = 1/2$ . При  $\beta = \infty$ ,  $\delta\tau = 0$ .

Підставляючи  $\tau_0$  в (13), одержимо  $f(\tau_0)$  у вигляді:

$$f(\tau_0) = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{\beta\tau_u}{\beta+1}}, \quad (16)$$

Причому

$$f(\tau_0) /_{\beta=1} = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{\tau_u}{2}},$$

$$f(\tau_0) /_{\beta=\infty} = \frac{4}{3} \sqrt{\tau_u}.$$

На рисунку 2 показаний вигляд імпульсів при  $\beta = 1$  та  $\beta = \infty$  [10, с. 59–70].

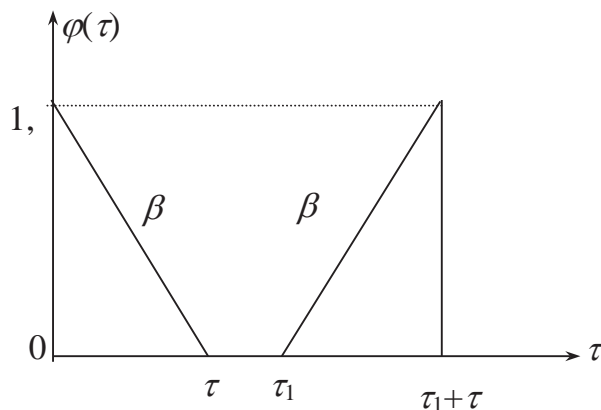


Рис. 2. Вигляд імпульсу лазера при  $\beta = 1$  та  $\beta = \infty$

При цьому необхідно враховувати різні види імпульсів лазера, так при лазерному нагріванні речовини варто використовувати імпульси з  $\beta = \infty$ , оскільки при цьому досягається температура в  $\sqrt{2}$  раз більша, ніж у випадку  $\beta = 1$  при фіксованій енергії імпульсу лазера.

При відомих теплофізичних властивостях матеріалу, з якого виготовлений дрон (порогова шільність потужності  $q_{в}$ , за якої відбувається випарювання матеріалу), технічних характеристиках лазерного засобу ураження (потужність випромі-

нювання  $R$ , характеристиках імпульсу впливу  $\tau$  і  $\beta$ , діаметр апертури передавача  $D$ , довжини хвилі випромінювання  $\lambda$ , діаметр променя на об'єкті ураження  $d$ ), відстань  $R$  між об'єктом і місцем розташування засобом ураження можна оцінити за виразом:

$$d = \frac{\lambda}{D} R. \quad (17)$$

**Висновки.** Таким чином, при наявних потужностях лазерних засобів ураження, теплофізичних

властивостей матеріалу обшивки дрона, умов розповсюдження лазерного променя, можна розрахувати максимальну відстань розміщення лазерних засобів ураження від лінії зіткнення, при якій літальний апарат буде уражений з високою ймовірністю.

Знання теплофізичних властивостей речовини є необхідною умовою для ефективного використання впливу лазерного випромінювання різної форми імпульсу та тривалості.

#### Список літератури:

1. Романюк В.А., С.О. Стародубцев. Дослідження ефективності лазерних методів виявлення безпілотних літальних апаратів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. № 5. Том 34 (73). С. 22–26.
2. Ростопчин В.В. Лазерні комплекси та системи, особливості застосування і оцінка перспектив. *SDT Industrial Technology, Ottobrunn, Germany*. С. 1–26.
3. Володимир Заблоцький. Бойові лазери як світовий тренд в розробках зброї нового покоління. URL: <http://opk.com.ua/> (дата звернення: 23.03.2024).
4. Р.В. Корольов, Н.О. Королюк, О.В. Петров, К.В. Сюлев. Аналіз сучасних засобів знищення безпілотних літальних апаратів. *Збройна боротьба: теорія, забезпечення, досвід. Збірник наукових праць ХНУПС*. 2017. Том 4(53). С. 17–21.
5. Зброя проти дронів. Топ 8 технологій, які здатні знищити БПЛА ворога. URL: <https://focus.ua/uk/digital/549552-top-8-vidov-oruzhiya-protiv-dronov-i-bpla-okkupantov/> (дата звернення: 12.04.2024).
6. У Британії вперше випробували лазерну зброю для збиття повітряних цілей. URL: <https://www.volynnews.com/news/all/u-brytaniyi-vpershe-vyprobuvaly-lazernu-zbroiu-dlia-zbytta-povitrianykh-tsil/> (дата звернення: 28.03.2024).
7. Роман Тищенко. Збивати ракети лазером більше не фантастика: як це змінить поле бою. URL: <https://www.liga.net/ua/world/articles/odyn-postril-do-5-zbyvaty-rakety-lazerom-bilshe-ne-fantastyka-iaak-tse-zminyt-pole-boiu/> (дата звернення: 16.04.2024).
8. Вейко В.П. Технологічні лазери і лазерне випромінювання. Видання 2-е, виправлене і доповн. СПбДУ, 2007. 52 с.
9. Таблиці фізичних величин. Під ред. І. К Кікоїна. М.: 1978. 1008 с.
10. Реді Дж. Дія потужного лазерного випромінювання. Пер. с англ. М.: 1984. 470 с.

#### Romanyuk V.A., Starodubtsev S.O. ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF THE COVERING MATERIAL OF UAVS ON THE EFFICIENCY OF LASER DEVICES

*The article is devoted to the study of the effect of laser radiation on the material of the hulls of aircraft and the possibility of its use as a means of defeating aerial targets.*

*It was determined that the traditional weapons systems used in the conduct of hostilities are increasingly less effective at the present time, especially in the fight against unmanned aerial objects. Because of this, experts drew attention to the possibility of using combat lasers as a means of defeat. What is the current state and prospects of creating effective samples of laser weapons that use a powerful beam as a striking tool, its strengths and weaknesses?*

*Taking into account the need to counter new types of threats, the question arises whether quantum-optical means can replace traditional types of weapons and when this can happen? Hard to say. But, taking into account how this area is developing, we can talk about real achievements in the development of laser weapons.*

*The advantages of laser weapons in comparison with conventional weapons are small costs for hitting objects, the speed of hitting (at the speed of light), an unlimited number of shots, thanks to its speed and target tracking systems, it can hit many targets at the same time, under favorable weather conditions, it can reach very long distances. Regarding the disadvantages of this type of weapon, they require a lot of energy, since the means emit a lot of heat during use, additional cooling is required, firing only in a straight line, strong dependence on the state of the atmosphere.*

*Laser weapons of direct destruction allow to violate the structural integrity of the aircraft, initiate its explosion or intense burning of explosive or flammable substances located on the object. Laser radiation is produced as part of an orderly process of forced emission. The laser emits coherent monochromatic light in the form of a parallel beam of directed energy, which propagates at the speed of light, which is tens of thousands of times faster than the speed of modern rockets. This indicates that there is no alternative to the development of combat lasers.*

**Key words:** laser weapons, damage to objects, laser beam.