

## ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 621.373.826:691.175

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.1>**А. В. БЕРНАЦЬКИЙ**

кандидат технічних наук, старший дослідник,  
завідувач відділу спеціалізованої високовольтної техніки  
та лазерного зварювання  
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона  
Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0002-8050-5580

**Ю. В. ЮРЧЕНКО**

провідний інженер відділу спеціалізованої високовольтної техніки  
та лазерного зварювання  
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона  
Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0001-9253-009X

**О. В. СІОРА**

науковий співробітник відділу спеціалізованої високовольтної техніки  
та лазерного зварювання  
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона  
Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0003-1927-790X

**М. В. СОКОЛОВСЬКИЙ**

провідний інженер відділу спеціалізованої високовольтної техніки  
та лазерного зварювання  
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона  
Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0003-3243-5060

**І. В. СІОРА**

кандидат хімічних наук,  
науковий співробітник відділу біомедичних проблем поверхні  
Інститут хімії поверхні імені О. О. Чуйка  
Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0002-4436-8945

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ  
НА ПОЛІМЕРНІ МАТЕРІАЛИ**

*FPV (First Person View) дрони отримали значний розвиток завдяки швидкому прогресу в електроніці та технологіях. Вони активно використовуються у спортивних перегонках, відеозйомці, доставці вантажів, моніторингу, а також у військових цілях, особливо для розвідки й доставки вибухових пристроїв. Сучасні FPV дрони мають розміри від 50 мм до понад 300 мм, з гвинтами, виготовленими з матеріалів на основі полікарбонату або карбону. Ці матеріали забезпечують легкість конструкції та високу ударостійкість, що робить їх складними для традиційних методів знешкодження. Враховуючи зростаючу загрозу їхнього використання у військових та терористичних операціях, розробляються нові системи протидії FPV дронам. Зокрема, лазерні системи стають одним з перспективних засобів боротьби, оскільки дозволяють точково впливати на дрони на відстані без витрат на боєприпаси. У таких системах головною метою є руйнування ключових компонентів дрона, зокрема гвинтів, які через високу термочутливість стають вразливими до лазерного випромінювання. Для дослідження впливу лазерного випромінювання на пропелери FPV дронів проводились випробування із застосуванням Nd:YAG-лазера «DY044» з потужністю до 4,4 кВт і довжиною хвилі  $\lambda=1,06$  мкм. Пропелери для тестів були виготовлені з полікарбонату, діаметром 7,5 дюймів. Випробування проводились при різних потужностях лазерного випромінювання та діаметрах пучка. Пропелер закріплювався на дралі та обертався зі швидкістю 2000 обертів за хвилину під кутом  $90^\circ$  відносно лазерного променя, діаметр якого варіювався від 4 до 10 мм. Згідно з результатами досліджень,*

час опромінення менш ніж 2 секунди та потужність 2 кВт виявилися недостатніми для гарантованого руйнування пропелера. Однак при потужності 4 кВт та часу опромінення 1–2 секунди спостерігалося гарантоване руйнування полікарбонату. При збільшенні діаметра лазерного променя до 10 мм і потужності 4 кВт руйнування відбувалося лише при збільшенні часу опромінення до 2 секунд. Аналіз поглинання енергії пропелером показав, що при потужності випромінювання 500 Вт після проходження через пропелер із полікарбонату 290 Вт поглиналося матеріалом, що становить 58%. Отримані результати підтверджують перспективність використання лазерних систем для ефективного знешкодження FPV дронів, особливо завдяки можливості налаштування параметрів випромінювання для досягнення гарантованого руйнування критичних компонентів, таких як пропелери.

**Ключові слова:** FPV дрони, гвинти дронів, полімерні матеріали, лазерне випромінювання, термічний вплив, руйнування, плавлення.

A. V. BERNATSKYI

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,  
Head of the Department of Specialised High-Voltage Equipment  
and Laser Welding  
E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0002-8050-5580

YU. V. YURCHENKO

Lead Engineer at the Department of Specialised High-Voltage Equipment  
and Laser Welding  
E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0001-9253-009X

O. V. SIORA

Researcher at the Department of Specialised High-Voltage Equipment  
and Laser Welding  
E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0003-1927-790X

M. V. SOKOLOVSKYI

Lead Engineer at the Department of Specialised High-Voltage Equipment  
and Laser Welding  
E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0003-3243-5060

I. V. SIORA

Candidate of Chemical Sciences,  
Researcher at the Department of Biomedical Surface Problems  
Chuiko Institute of Surface Chemistry  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0002-4436-8945

## STUDY OF THE EFFECT OF LASER RADIATION ON POLYMERIC MATERIALS

FPV (First Person View) drones have developed significantly due to rapid advances in electronics and technology. They are widely used in sports racing, videography, cargo delivery, monitoring, and military applications, especially for reconnaissance and delivery of explosive devices. Modern FPV drones range in size from 50 mm to over 300 mm, with propellers made of polycarbonate or carbon fibre materials. These materials provide lightweight construction and high impact resistance, making them challenging for traditional methods of neutralisation. Given the growing threat of their use in military and terrorist operations, new systems are being developed to counter FPV drones. In particular, laser systems are becoming one of the most promising means of countering drones, as they allow for targeted effects on drones from a distance without the need for ammunition. In such systems, the main goal is to destroy key components of the drone, in particular the propellers, which are vulnerable to laser radiation due to their high thermal sensitivity. To investigate the effect of laser radiation on FPV drone propellers, tests were conducted using a DY044 Nd:YAG laser with a power of up to 4.4 kW and a wavelength of  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ . The test propellers were made of polycarbonate with a diameter of 7.5 inches. The tests were carried out at different laser powers and beam diameters. The propeller was mounted on the drill and

rotated at a speed of 2000 revolutions per minute at a 90° angle to the laser beam, whose diameter varied from 4 to 10 mm. According to the results of the study, an exposure time of less than 2 seconds and a power of 2 kW were insufficient to guarantee the destruction of the propeller. However, with a power of 4 kW and an irradiation time of 1–2 seconds, guaranteed destruction of polycarbonate was observed. When the laser beam diameter was increased to 10 mm and the power was 4 kW, destruction occurred only when the irradiation time was increased to 2 seconds. The analysis of energy absorption by the propeller showed that at a radiation power of 500 W, 290 W was absorbed by the material after passing through the polycarbonate propeller, which is 58%. The results confirm the prospects of using laser systems for the effective neutralisation of FPV drones, especially due to the possibility of adjusting the radiation parameters to achieve guaranteed destruction of critical components such as propellers.

**Key words:** FPV drones, drone propellers, polymeric materials, laser radiation, thermal effects, fracture, melting.

### Постановка проблеми

FPV (First Person View) дрони за останнє десятиліття отримали значний розвиток завдяки стрімкому прогресу в електроніці, акумуляторних технологіях та бездротовому зв'язку. FPV дрони широко використовуються як для спортивних перегонів, так і для відеозйомки, досліджень, моніторингу, доставки та військових цілей [1]. Здатність таких дронів передавати відеосигнал у реальному часі дозволяє операторам бачити зображення «очима» дрона, що робить їх надзвичайно ефективними у різних умовах і середовищах. Зокрема, військове застосування FPV дронів відкриває нові можливості для розвідки, спостереження та доставки малих вибухових пристроїв, що ставить перед розробниками систем протидії нові виклики [2]. Типові FPV дрони, залежно від їх призначення, можуть мати досить компактні розміри, варіюючись від мініатюрних моделей діаметром 50–100 мм до більш потужних дронів з діаметром 250–300 мм і більше. Гвинти дронів також мають широкий діапазон розмірів: від 2 дюймів (для малих дронів) до 6–7 дюймів (для більших). Залежно від завдань, гвинти можуть бути три- або чотирилопатевими. Найчастіше вони виготовляються з легких і міцних матеріалів, таких як полімери на основі нейлону, полікарбонату, вуглепластику, що забезпечує низьку вагу і високу ударостійкість. Корпуси самих дронів зазвичай виготовляють із карбону або композитних матеріалів, які забезпечують оптимальне співвідношення між міцністю та масою [3]. Зростаюча загроза використання FPV дронів у військових і терористичних операціях спонукала розробку різних систем протидії. Традиційні методи боротьби з дронами включають радіоелектронне придушення, фізичне знищення за допомогою сіток або кінетичних засобів, а також спеціалізовані радіолокаційні системи для їх виявлення [4]. Проте такі методи не завжди ефективні, особливо в умовах швидкого пересування FPV дронів та їх здатності уникати звичайних засобів перехоплення. У зв'язку з цим усе більше уваги приділяється розробці лазерної зброї як перспективного методу боротьби з дронами. Лазерні системи мають ряд переваг, серед яких висока точність, можливість миттєвої доставки енергії на віддалені об'єкти, а також відсутність необхідності у витратних боєприпасах [4–5]. При взаємодії лазерного випромінювання з FPV дронами, головною метою є виведення з ладу їх основних компонентів – гвинтів, електроніки або акумулятора. Зокрема, гвинти дрона, виконані з термочутливих матеріалів, є однією з найбільш вразливих частин до впливу лазерного випромінювання. Нагрівання гвинтів до критичної температури може призвести до їхньої деформації або повного руйнування, що миттєво виводить дрон із ладу [6]. Таким чином, лазерна зброя стає перспективним засобом боротьби з FPV дронами, надаючи змогу їх швидкого та ефективного знищення на відстані.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Були проведені кілька досліджень впливу лазерного випромінювання на гвинти дронів. Одне з них показало [6], що лопаті, виготовлені з вуглепластику або інших композитів, більш стійкі до високих температур, ніж полімерні матеріали, але вони також не є повністю захищеними від дії лазера. Лазерне випромінювання може руйнувати смолу, що з'єднує волокна, або викликати вигорання окремих вуглецевих шарів. Це призводить до зниження механічної міцності гвинта. Так при потужності лазерного випромінювання 30 кВт, діаметрі пучка 80 мм та перпендикулярному опроміненню, через 3 умовні часові одиниці з'являються перші іскри, а вже через 15 умовних часових одиниць гвинт починає руйнуватися. Нагріта частина гвинта фактично більша за площу поверхневих пошкоджень. Площа поверхневих пошкоджень у випробуванні добре корелює з видимими поверхневими пошкодженнями на гвинті.

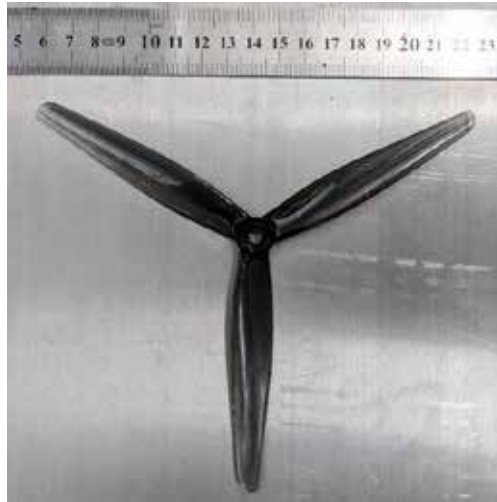
В іншому дослідженні випробовувались гвинти з полімерного матеріалу [7]. Для експериментів було обрано 2 гвинти, чорного і білого кольору з глянцевою поверхнею. Дослідження показують, що матеріали та колір пропелерів суттєво впливають на їхню стійкість до високих температур і лазерного випромінювання. Чорні пропелери поглинають більше енергії на довжині хвилі 1070 нм (до 95.8%), що робить їх вразливішими до лазерного впливу, тоді як білі лопаті поглинають лише 36.3%. Однак, при довших хвилях лазерного випромінювання (1550 нм і 2036 нм), обидва види стають однаково сприйнятливими, оскільки їхня абсорбція зростає до 85.8%. Термодеградація полімерів починається при температурах 446°C–457°C.

### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є вивчення поведінки гвинтів FPV-дрону з полімерних матеріалів під дією лазерного випромінювання високої потужності для визначення оптимальних параметрів руйнування цього матеріалу.

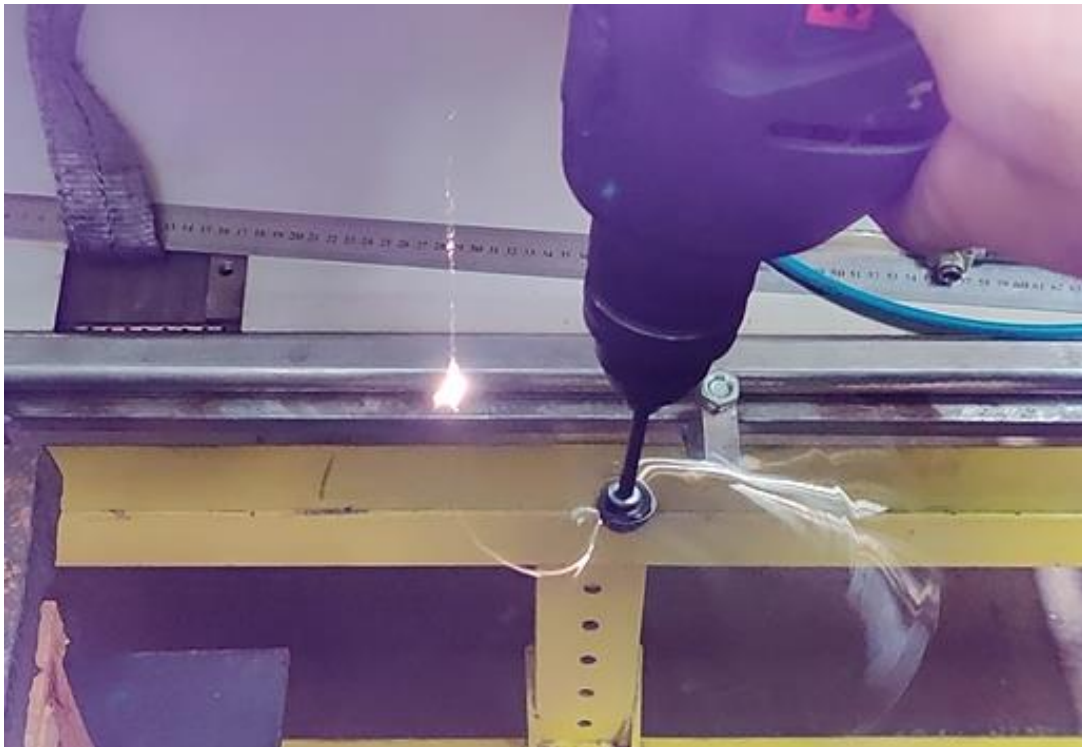
**Викладення основного матеріалу дослідження**

Для проведення досліджень використовувався Nd:YAG-лазер «DY044» з потужністю випромінювання до 4,4 кВт та довжиною хвилі випромінювання  $\lambda=1,06$  мкм, виробництва фірми «Rofin-Sinar» (виробництва Німеччини). В якості матеріалу для випробувань використовувався пропелер FPV дрона з полікарбонату діаметром 7,5 дюймів (рис. 1).



**Рис. 1. Пропелер FPV дрона з полікарбонату**

Під час випробування гвинт закріплювався в електричну дріль та обертався зі швидкістю 2000 об/хв під кутом  $90^\circ$  відносно падіння лазерного променя (рис. 2). Діаметр пучка лазерного випромінювання на пропелері становив 4...10 мм, потужність випромінювання при цьому була на рівні 2...4 кВт.



**Рис. 2. Проведення випробування вивчення з вивчення поведінки гвинтів FPV-дрону з полімерних матеріалів під дією лазерного випромінювання високої потужності**

В таблиці 1 наведено результати випробувань. Аналіз результатів випробувань дозволяє стверджувати, що часу менше 2 секунд та потужності 2 кВт недостатньо для гарантованого руйнування гвинта. Було вирішено збільшити потужність до 4 кВт та час опромінення до 1–2 с. При цих параметрах спостерігалось гарантоване руйнування матеріалу. При збільшенні діаметру лазерного променя до 10 мм, при тій же потужності 4 кВт і часу

опромінення 1с, було наявне оплавлення без руйнування, але при збільшенні часу опромінення до 2 секунд матеріал гарантовано руйнувався. При цьому глибина проплавлення була більшою, ніж при потужності 2 кВт, діаметрі променю 4 мм і часу опромінення до 1 секунди включно.

Таблиця 1

Результати випробувань

№	P, кВт	t, с	Ø променю, мм	Кут, °	Фото	Результат
1	2	0,5	4	90		Слабке оплавлення
2	2	1	4	90		Слабке оплавлення
3	4	2	4	90		Гарантоване руйнування
4	4	1	4	90		Гарантоване руйнування
5	4	1	10	90		Оплавлення без руйнування
6	4	2	10	90		Гарантоване руйнування



Для визначення потужності яку поглинає пропелер під час випробування використовувався непрохідний вимірювач потужності лазерного випромінювання калориметричного типу (рис. 3, а). На рис. 3, б показаний процес проведення експерименту з використанням вказаного вимірювача.

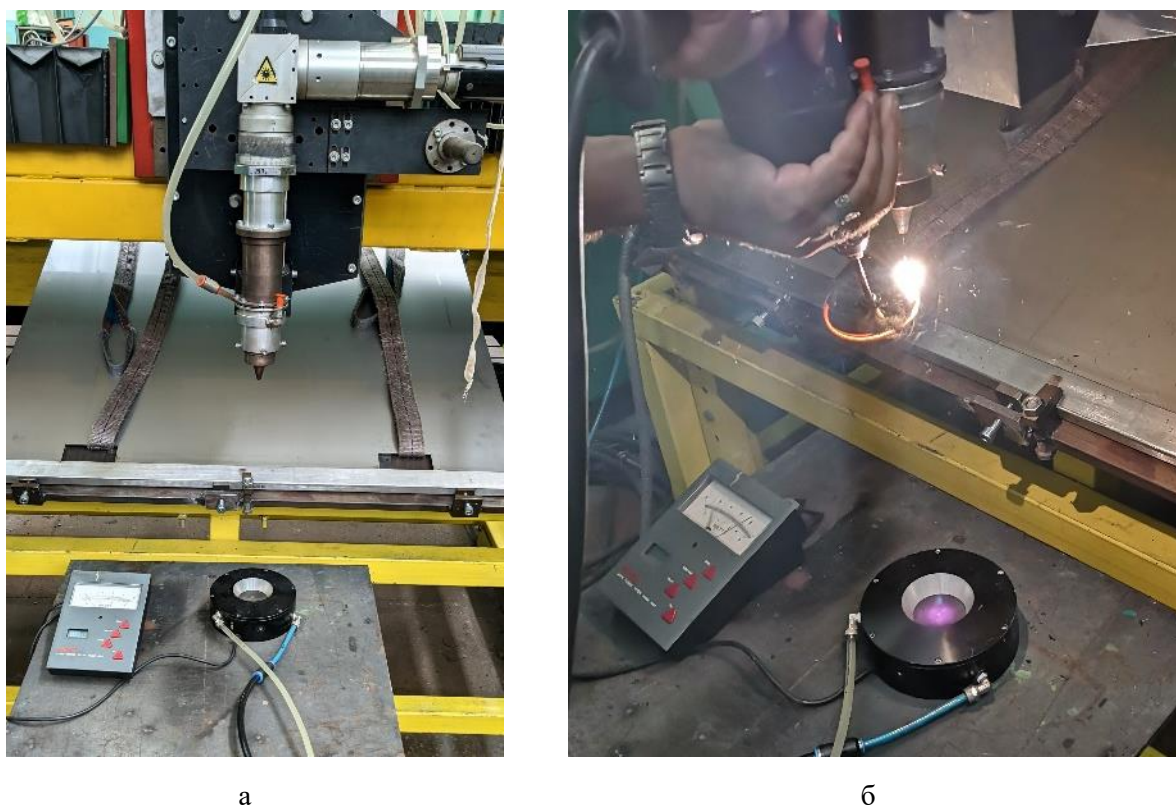


Рис. 3. Випробувальний стенд: а – загальний вигляд; б – процес проведення експерименту

За результатами вимірювань було визначено, що при генерації лазером потужності випромінювання 500 Вт, після проходження через рухомий пропелер з полікарбонату, на вимірювач потужності потрапляє приблизно 290 Вт, що становить біля 58% поглинання.

Порівняння одержаних даних з результатами експериментів інших дослідників [6, 8], дозволяє зробити висновок, що існують різні способи нанесення достатньої шкоди компонентам безпілотників, що дозволяє припинити його нормальний політ. Експерименти [8] показують, що після початку дії лазерного випромінювання на деталі безпілотників може пройти від десятих часток секунди (0,1 сек) до десятків секунд (10 сек), перш ніж буде досягнуто бажаного ефекту. Необхідний час опромінення для досягнення пошкодження, як показали експерименти [6], сильно залежить від обраного компонента мішені і конкретних матеріалів, з якого він складається. Це свідчить про те, що вибір точки прицілювання має вирішальне значення для ефективності використання лазерного випромінювання для нейтралізації дронів і що для того, щоб високоенергетичний лазер був ефективним проти безпілотників, необхідно добре розуміти слабкі місця дронів.

#### Висновки

Результати проведених досліджень показують, що для гарантованого руйнування гвинтів з полікарбонату необхідна потужність лазерного випромінювання не менше 4 кВт і час опромінення від 1 до 2 секунд. Діаметр пучка лазерного випромінювання також відіграє важливу роль: при діаметрі 4,0 мм руйнування досягається швидше, а при діаметрі 10,0 мм потрібен довший час опромінення, через більше розсіювання енергії. Оплавлення без руйнування спостерігається при коротшому часу взаємодії. Полікарбонатні лопаті поглинають близько 58% лазерного випромінювання.

**Фінансування.** Дослідження виконано за фінансової підтримки Національним фондом досліджень України проекту № 2023.04/0166 «Дослідження впливу лазерного пучка на матеріали деталей БПЛА та обґрунтування технічних параметрів лазерного обладнання мобільного комплексу для боротьби з ними» за договором грантової підтримки № 155/0166 від 01.08.2024.

## Список використаної літератури

1. Steinvall O. The potential role of laser in combating UAVs: part 2; laser as a countermeasure and weapon. *Technologies for Optical Countermeasures XVIII and High-Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects V*. 2021. Vol. 11867, P. 14-30. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2601755>
2. Kanu N. J., Gupta E., Pendkar S. M., Sakhare S. A., Munot A., Gupta V. K., Verma G. C. A few suggestions to improve anti-drone measures for combating against the drone menace. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. 2024. Vol. 105. P. 761-787. URL: <https://doi.org/10.1007/s40032-024-01047-x>
3. Chan K. W., Nirmal U., Cheaw W. G. Progress on drone technology and their applications: A comprehensive review. *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 2030. No. 1. Id. 020308. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5066949>
4. Castrillo V., Manco A., Pascarella D., Gigante G. A review of counter-UAS technologies for cooperative defensive teams of drones. *Drones*. 2022. Vol. 6, No. 3. Id. 65. URL: <https://doi.org/10.3390/drones6030065>
5. Zhao S., Xie R., Wan J. Design of anti-drone laser weapon systems. *High-Power Lasers and Applications XI*. 2020. Vol. 11544. Id. 115440A. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2575171>
6. Schleijsen R., Binsbergen S., Geljon M., Meuken D., Deiana D., Leeuwen B. 30kW laser experiments against drones. *High-Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects IV*. 2020. Id. 115390A. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2574461>
7. Allheily V., Foulon B., Couchoux M., Lefranc L.-X., Guerchoux M., Bruder C., Merlat L. Testing the vulnerability of lightweight drone propellers to high-energy laser irradiations. *High Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects VI*. 2023. Vol. 12739. Id. 1273907. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2682925>
8. Taillandier M., Peiffer R., Colomer B., Ortiz R., Chalumeau E., Pommies M. High-energy laser experiments for vulnerability studies in the context of the European TALOS program. *High-Power Lasers and Technologies for Optical Countermeasures*. 2022. Vol. 12273. P. 68-79. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2635076>

## References

1. Steinvall, O. (2021). The potential role of laser in combating UAVs: part 2; laser as a countermeasure and weapon. *Technologies for Optical Countermeasures XVIII and High-Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects V*, 11867, 14-30. <https://doi.org/10.1117/12.2601755>
2. Kanu, N. J., Gupta, E., Pendkar, S. M., Sakhare, S. A., Munot, A., Gupta, V. K., & Verma, G. C. (2024). A few suggestions to improve anti-drone measures for combating against the drone menace. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 105, 761-787. <https://doi.org/10.1007/s40032-024-01047-x>
3. Chan, K. W., Nirmal, U., & Cheaw, W. G. (2018). Progress on drone technology and their applications: A comprehensive review. *AIP Conference Proceedings*, 2030(1), 020308. <https://doi.org/10.1063/1.5066949>
4. Castrillo, V., Manco, A., Pascarella, D. & Gigante, G. (2022). A review of counter-UAS technologies for cooperative defensive teams of drones. *Drones*, 6(3), 65. <https://doi.org/10.3390/drones6030065>
5. Zhao, S., Xie, R., & Wan, J. (2020). Design of anti-drone laser weapon systems. *High-Power Lasers and Applications XI*, 11544, 115440A. <https://doi.org/10.1117/12.2575171>
6. Schleijsen, R., Van Binsbergen, S., Geljon, M., Meuken, D., Deiana, D., & van Leeuwen, B. (2020). 30 kW laser experiments against drones. *Technologies for Optical Countermeasures XVII; and High-Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects IV*, 11539, 34-44. <https://doi.org/10.1117/12.2574461>
7. Allheily, V., Foulon, B., Couchoux, M., Lefranc, L.-X., Guerchoux, M., Bruder, C., & Merlat, L. (2023). Testing the vulnerability of lightweight drone propellers to high-energy laser irradiations. *High Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects VI*, 12739, 1273907. <https://doi.org/10.1117/12.2682925>
8. Taillandier, M., Peiffer, R., Colomer, B., Ortiz, R., Chalumeau, E., & Pommies, M. (2022). High-energy laser experiments for vulnerability studies in the context of the European TALOS program. *High-Power Lasers and Technologies for Optical Countermeasures*, 12273, 68-79. <https://doi.org/10.1117/12.2635076>