

А. В. САВЧЕНКО, Д. К. ОБОДЕЦЬ

Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ДВИГУНІВ
БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Предметом дослідження є сучасний стан та перспективи розвитку ринку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та їх енергетичних установок. **Метою** роботи є виявлення тенденцій розвитку двигунів БПЛА різних класів. **Завдання:** збір, систематизація та аналіз інформації про найбільш поширені двигуни розвідувально-ударних БПЛА оперативно-тактичного рівня, а також БПЛА класу «боєприпас, що баражує». В статті надано стислий опис різних типів енергетичних установок БПЛА, наведено їх основні переваги та недоліки, які часто є визначальними при виборі типу енергетичної установки конкретного БПЛА. Показано, що для використання в БПЛА середнього та великого радіусу дії найкращим чином підходить енергетична установка з двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ). Показано, що в розвідувально-ударних БПЛА оперативно-тактичного рівня найчастіше використовуються чотиритактні ДВЗ. Наведено особливості конструкції та характеристики чотиритактних ДВЗ, що набули найбільшого поширення в БПЛА. Визначено, що впровадження газотурбінного наддуву чи збільшення його тиску є основним засобом форсування чотиритактних ДВЗ, який дає змогу досягти одночасно високої питомої потужності та високого ефективного ККД двигуна в широкому діапазоні висот його експлуатації. Показано, що для двигуна БПЛА дальнього радіусу дії однією з найбільш пріоритетних задач є забезпечення низької питомої ефективної витрати палива. Так, на сьогодні відзначається тенденція до поширення використання високофорсованих авіаційних дизелів в БПЛА дальнього радіусу дії. Визначено, що головними вимогами до двигунів БПЛА класу «боєприпас, що баражує» є висока питома потужність, низька вартість та пристосованість до масового виробництва. В роботі показано, що в БПЛА класу «боєприпас, що баражує» на сьогодні надзвичайно широко розповсюджені бензинові двотактні ДВЗ з кривошипно-камерною продувкою. Наведено особливості конструкції та характеристики двотактних ДВЗ БПЛА. Основними засобами забезпечення високої питомої потужності таких двотактних ДВЗ є збільшення частоти обертання колінчастого валу, оптимізація процесів газообміну та облегшення конструкції за рахунок використання нових матеріалів. **Висновок.** В роботі показано, що в залежності від типу БПЛА може суттєво варіюватися сукупність вимог до двигуна. Визначено сучасні тенденції розвитку двигунів БПЛА різних класів, визначено потенційно перспективні напрямки з підвищення ефективності двигунів та комплексного покращення їх показників та характеристик.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння; безпілотний літальний апарат; питома потужність; турбонаддув; процес продувки; питома витрата палива.

Вступ

Останнім часом технології безпілотних літальних апаратів (БПЛА) стрімко розвиваються разом із швидким розвитком мікроелектроніки та комунікаційних технологій. У порівнянні з пілотованими літальними апаратами БПЛА, зазвичай, мають суттєво менші габаритні розміри, меншу вагу, невибагливі до характеристик злітно-посадкової смуги, характеризуються відносно низькими витратами на виробництво та використання. Зважаючи на це, БПЛА широко розповсюджені при вирішенні як цивільних так і

військових задач. Так, в ході сучасної російської війни проти України, БПЛА відіграли надзвичайно важливу роль у стратегіях забезпечення обороноздатності, проведення та розвитку бойових дій по визволенню захоплених агресором територій, що дає змогу стверджувати про високу актуальність науково-технічного забезпечення та активного розвитку БПЛА з метою зміцнення обороноспроможності України [1].

Аналіз застосування засобів розвідки у воєнних конфліктах свідчить, що сьогодні більше половини розвідувальної інформації про наземні об'єкти противника отримуються із застосуванням



[Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

авіаційних засобів розвідки і відзначається стійка тенденція до постійного збільшення цієї частки.

Як свідчить міжнародна та вітчизняна практика, БПЛА можуть бути застосовані для збору розвідувальних даних на обширних територіях, надаючи критично важливу інформацію про переміщення ворожих військ, місцезнаходження важливих об'єктів та іншу стратегічну інформацію. Вони також можуть бути використані для регулярного спостереження за кордонами, що допомагає своєчасно виявляти загрози національній безпеці. Крім того, БПЛА здатні доставляти необхідні матеріали, такі як медичне обладнання, їжу та паливо, у райони, постраждалі від воєнних конфліктів або з обмеженим доступом. Використання БПЛА у воєнних цілях може значно покращити ефективність та безпеку операцій, знижуючи людські втрати [1-3]. Усе це тільки підсилює високу актуальність вирішення проблем не тільки самих БПЛА, а також і енергетичних їх установок, ефективна робота яких є одним із головних факторів вирішення тактико-технічних завдань БПЛА. Безумовним є і те, що для України сьогодні питання подібних вітчизняних енергетичних установок є надзвичайно важливою науково-технічною задачею.

Крім того, необхідно підкреслити і те, що на сьогоднішньому етапі розвитку військових технологій в Україні найбільш перспективним напрямком є впровадження безпілотних систем озброєння і, в першу чергу, ударних безпілотних літальних апаратів, серед яких особливою популярністю користуються БПЛА малого та середнього розміру через достатньо високу ефективність їх використання та, водночас, їх зручність і високу мобільність [1].

Метою роботи є виявлення сучасних тенденцій та перспектив розвитку двигунів БПЛА різних класів. **Завдання:** збір, систематизація та аналіз інформації про конструкцію, показники та характеристики найбільш поширених двигунів розвідувально-ударних БПЛА оперативно-тактичного рівня, а також БПЛА класу «боєприпас, що баражує».

1. Типи двигунів БПЛА

Ключовим елементом будь-якого БПЛА є його енергетична установка, яка забезпечує рух і живлення бортових систем. Основними варіантами енергетичних установок для БПЛА є двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ), реактивний двигун, турбогвинтовий двигун чи електричний двигун з акумулятором.

Електричні двигуни для БПЛА набули широкого застосування в БПЛА завдяки низькому рівню шуму, відносно високій питомій потужності самого двигуна, невеликій вартості, підвищеній точності керування потужністю двигуна. Варто також відзначити не тільки високу ефективність силової установки на базі електричного двигуна, а і низький рівень термічного сліду такого БПЛА. Однак, сучасні електричні акумулятори, що використовуються для живлення електродвигунів, мають щільність енергії приблизно в 50 разів меншу, ніж рідке паливо нафтового походження. Так, сучасні досконалі акумулятори мають здатність накопичити до 0,9...1 МДж/кг, а для рідкого палива нафтового походження ця величина становить 42,5...44 МДж/кг. Усе це є фактором суттєвого обмеження часу польоту та радіусу дії БПЛА з електродвигуном.

Реактивні двигуни та турбогвинтові двигуни зазвичай використовують на великих БПЛА з високою максимальною швидкістю. Проте, вони погано підходять для польоту з невисокими швидкостями та з частковим навантаженням. Ці двигуни характеризуються набагато більш високою вартістю та складністю в експлуатації в порівнянні з ДВЗ і в рамках даної статті детально розглядатися не будуть.

ДВЗ використовуються в БПЛА протягом тривалого часу і забезпечують високу потужність при відносно невеликій масі. Основною перевагою ДВЗ є відносна мала вартість, простота конструкції, відносно висока питома потужність, можливість забезпечення високого радіусу дії зважаючи на високу енергетичну щільність палива. БПЛА з ДВЗ мають перевагу в тривалості польоту, особливо для великих БПЛА, які потребують високої потужності тривалий час. Однак, використання ДВЗ супроводжується високим рівнем шуму та вібрації, що може бути недоліком у випадках, де важлива непомітність (наприклад, розвідувальні місії).

Зважаючи на наведене вище, у випадку використання в конкретній моделі БПЛА, ДВЗ та електродвигун практично не конкурують між собою, а займають кожен свою сферу застосування. Вибір між ДВЗ і електричним двигуном здебільшого обумовлені вимогами до тактико-технічних характеристик конкретної моделі БПЛА. ДВЗ забезпечують більшу тривалість та дальність польоту, а також вищу потужність, що робить їх кращими для тривалих місій. Однак, ДВЗ при роботі є джерелом високого рівню шуму та інтенсивного теплового випромінювання, що збільшує помітність БПЛА. Електричні двигуни, з іншого боку, є менш потужними, але більш екологічними і тихими, що робить їх придатними для коротких місій та цивільного застосування. Таким чином, необхідно

зробити висновок про те, що для використання в БПЛА середнього та великого радіусу дії найкращим чином підходить енергетична установка з ДВЗ.

Розглянемо більш детально типи ДВЗ, що використовуються в сучасних БПЛА. До найбільш поширених рішень можна віднести бензинові чотиритактні ДВЗ як з наддувом, та і без нього, турбодизелі, а також легкі двотактні бензинові ДВЗ.

2. Чотиритактні ДВЗ

Чотиритактні ДВЗ набули найбільшого поширення в розвідувально-ударних БПЛА оперативного-тактичного рівня. Параметри та показники найбільш поширених чотиритактних двигунів для БПЛА наведені в таблиці 1.

Двигун Rotax-912 (БПЛА Bayraktar TB2, Турція) можна вважати базовою моделлю відомого австрійського виробника двигунів Rotax. Двигун є дуже поширеним в легкомоторній авіації зважаючи на доведену, оптимізовану конструкцію, високу надійність та великий ресурс, гарні техніко-економічні показники та помірну ціну для цього класу двигунів (приблизно 19000 \$). Rotax-912 – чотиритактний чотирициліндровий авіаційний двигун внутрішнього згоряння з горизонтальним опозитним розташуванням циліндрів. На двигуні реалізовано рідинне охолодження головок циліндрів,

повітряне охолодження самих циліндрів. Газорозподільчий механізм виконано за схемою OHV – в блоці циліндрів розташовано єдиний розподільчий вал, який через штовхачі, штанги та коромисла приводить до руху клапани. На двигуні реалізована подвійна система запалювання, дія якої заснована на розрядженні конденсаторів (Capacitor discharge design). Основою системи живлення паливом є два карбюратори. [4]

Rotax-912 не має системи наддуву, що обумовлює помірно значення питомої потужності, а також суттєву втрату потужності зі збільшенням висоти польоту. Тобто такий двигун погано підходить для висотних БПЛА. Ці два фактори можна вважати головними серед тих, які обумовили обмежене використання Rotax-912 в БПЛА.

Найбільшого розповсюдження серед чотиритактних ДВЗ для БПЛА набув Rotax-914, що використовується в таких БПЛА: Bayraktar TB2 (Турція), Shahed 129 (Іран), Heron (Ізраїль), CAIG Wing Loong (Китай), General Atomics MQ-1 Predator (США) та інші. Орієнтовна вартість такого двигуна на ринку становить 38000 \$., маса двигуна 72 кг. Конструктивно Rotax-914 є дуже близьким до Rotax-912 і був розроблений на його базі. Двигун оснащується системою турбонаддуву для збільшення питомої потужності, а також для компенсування зменшення щільності повітря при збільшенні висоти.

Таблиця 1

Характеристики чотиритактних двигунів, що застосовуються для БПЛА

Двигун	Rotax-912	Rotax-914	Rotax-916	Lycoming O-320	Tusaş Engine Industries TEI-PD170	Lycoming DEL-120
Максимальна потужність, N_e , кВт	59,6	84,5	119	112	127,5	153,7
Частота обертання КВ, п, хв^{-1}	5800	5800	5800	2700	3880	3800
Маса двигуна	60	72	85,8	111	162	163,3
Питома потужність, кВт/кг	0,99	1,17	1,38	1,01	0,79	0,942
Ступінь стиснення	9	9	8,2	7	–	16,5
Кількість циліндрів	4	4	4	4	4	4
Діаметр циліндра, м	79,5	79,5	84	130,2	–	82
Хід поршня, м	61	61	61	98,4	–	90,4
Відношення S/D	0,767	0,767	0,726	0,756	–	1,102
Середня швидкість поршня, м/с	11,79	11,79	11,79	8,86	–	11,45
Робочий об'єм, см^3	1211	1211	1352	5240	2100	1910
Питома ефективна витрата палива, г/кВт*год	285	285	250	314	207	210
Виробник	Rotax, Австрія	Rotax, Австрія	Rotax, Австрія	Lycoming Engines, США	Tusaş Engine Industries, Турція	Lycoming Engines, США

Двигун Rotax-914 здатен забезпечувати злітну потужність (до висоти 2450 м) 84,5 кВт при частоті обертання колінчастого валу 5800 хв⁻¹. Номінальний тиск наддуву на цьому режимі становить 135 кПа. Питома потужність 1,17 кВт/кг.

Максимальна тривала потужність (до висоти 4875 м.) – 73,5 кВт при 5500 хв⁻¹. Тиск наддуву – 120 кПа; Питома потужність на тривалому режимі 1,02 кВт/кг. Питома витрата палива – 285 г/кВт*год; [5, 6].

Двигун Rotax-916 (БПЛА Elbit Hermes 900, Ізраїль) є подальшим розвитком сімейства Rotax-912. Від попередніх моделей відрізняється збільшеним до 1352 см³ робочим об'ємом за рахунок збільшення діаметру циліндру та дещо збільшеним тиском наддуву. Варто відзначити, що ступінь стиснення зменшили до 8,2, проте питома ефективна витрата палива зменшилася в порівнянні з попередніми моделями приблизно на 12 % [7].

Lycoming O-320 (БПЛА DRDO Rustom, Індія) – чотиритактний чотирициліндровий авіаційний двигун внутрішнього згоряння з горизонтальним опозитним розташуванням циліндрів та повітряним охолодженням. Двигун без наддуву. Базовий варіант цього двигуна був представлений ще в 1953 році, проте з тих пір було виконано велику кількість модифікацій. Двигун відрізняється з поміж інших великим робочим об'ємом, та невисокою швидкохідністю (середня швидкість поршня 8,86 м/с). Вочевидь, з метою забезпечення детонаційної стійкості (зважаючи на великий діаметр циліндру) ступінь стиснення становить 7. Питома потужність дорівнює 1,01 кВт/кг, що навіть перевищує цей показник для набагато більш швидкохідного Rotax-912. Достатньо високий рівень питомої потужності обумовлений, насамперед, облегшеною конструкцією – маса двигуна становить лише 111 кг при робочому об'ємі в 5,24 літри. Питома ефективна витрата палива є найбільшою серед усіх розглянутих чотиритактних ДВЗ і становить 314 г/кВт*год. Варто також відзначити, що в усьому діапазоні висот зі збільшенням висоти польоту зменшується максимальна потужність двигуна та погіршується його економічність [8].

Tusaş Engine Industries TEI-PD170 (БПЛА Anka-S; Bayraktar TB3; TAI Aksungur, Турція) – рядний чотирициліндровий авіаційний дизель з двоступінчастою системою газотурбінного наддуву, охолоджувачем наддувного повітря та акумуляторною системою живлення типу Common Rail. Робочий об'єм двигуна становить 2,1 л., маса двигуна – 162 кг, номінальна потужність 170 к.с. забезпечується від рівня моря до висоти 6096 м.; потужність на висоті 9144 м – 130 к.с.; потужність на висоті 13716 м – 70 к.с. Питома ефективна витрата палива –

207 г/кВт*год. Даний двигун є суттєво більш важким, складним та дорогим в порівнянні з іншими ДВЗ, а також характеризується відносно низькою питомою потужністю (0,79 кВт/кг), проте має дуже низьку питому витрату палива, а також дуже гарні висотні характеристики. Очевидно, що він гарно пристосований для використання на висотних БПЛА великого радіусу дії, які здатні дуже довгий час знаходитися в повітрі та виконувати завдання [9]. Наприклад, БПЛА TAI Aksungur з двигуном TEI-PD170 здатен знаходитися в повітрі до 60 годин поспіль та здолати до 6500 км.

Lycoming DEL-120 (БПЛА MQ-1C Gray Eagle, США) чотирициліндровий авіаційний дизель з газотурбінним наддувом та акумуляторною системою живлення типу Common Rail. Цей двигун має співвідношення S/D 1,102, що в цілому можна вважати типовим для дизелів. Варто звернути увагу, що цей дизель високофорсований за частотою обертання колінчастого валу. Так, за середньою швидкістю поршня та питомою потужністю він знаходиться практично на рівні з бензиновим двигуном Rotax-912. Двигун має низьку питому ефективну витрату палива і також дуже гарно підходить для використання в БПЛА великого радіуса дії [10].

Видно, що чотиритактні двигуни для БПЛА мають відносно складну та важку конструкцію, а також відносно низький рівень питомої потужності. Більшість двигунів має помірну номінальну частоту обертання колінчастого валу, що дає змогу зменшити втрати на тертя та створити більш сприятливі умови для перебігу процесу згоряння. Форсування двигуна виконується, як правило, за рахунок впровадження наддуву чи збільшення тиску наддуву. Цей підхід в комплексі дає змогу забезпечити відносно низьку питому ефективну витрату палива. Таким чином, зважаючи на вказане вище, чотиритактні ДВЗ використовуються, насамперед, для висотних БПЛА дальнього радіусу дії, оскільки саме в таких умовах переваги ДВЗ цього типу проявляються в найбільшому ступені. Так, наддув дає змогу нівелювати втрати потужності внаслідок зменшення щільності повітря зі збільшенням висоти польоту. Дальній радіус дії обумовлює необхідність мати на борту великий запас палива, вага якого є співставною чи навіть перевищуватиме вагу самого двигуна. Отже, забезпечення економічності чотиритактного двигуна для БПЛА дальнього радіусу дії є пріоритетною задачею, навіть якщо досягнення економічності буде ціною зменшення рівня питомої потужності самого двигуна. Це підтверджується, зокрема, використанням дизелів для БПЛА великого радіусу дії та з можливістю дуже довгого знаходження в повітрі.

Виконаний аналіз дозволяє стверджувати, що, чотиритактні ДВЗ погано підходять для використання в якості енергетичної установки для ударних БПЛА класу «боєприпас, що баражує» оскільки зазвичай використання таких БПЛА передбачено на малих висотах, а радіус їх дії відносно невеликий (а отже, паливна економічність не матиме суттєвого впливу на ТТХ БПЛА). Водночас, в результаті використання БПЛА цього класу передбачається його знищення, а отже, для цього класу висока вартість конструкції чотиритактного двигуна для БПЛА стає його суттєвим недоліком.

3. Двотактні ДВЗ

Наразі ударні БПЛА, які виробляються в Україні та здатні долати сотні кілометрів, використовують двотактні двигуни невеликої розмірності кривошипно-камерною продувкою, з номінальною потужністю в діапазоні 15-20 к.с. Найбільш поширеними двигунами для ударних БПЛА в Україні є двоциліндровий двигун DLE170 китайського виробника DLE з робочим об'ємом 170 см³, двоциліндровий двигун DA-215 вироблений американською компанією Desert Aircraft робочим об'ємом 215 см³, а також двоциліндровий двигун SP-210 німецької компанії SkyPower робочим об'ємом 210 см³.

Показники та характеристики найбільш поширених в Світі двигунів для БПЛА класу «боєприпас, що баражує» наведені в таблиці 1.

Варто відзначити, що переважна більшість двотактних авіаційних двигунів такого класу на ринку є короткоходними, тобто співвідношення S/D суттєво менше одиниці і лежить в діапазоні 0,6...0,8. Це дає змогу покращити якість процесу газообміну та форсувати двигун за частотою обертання колінчастого валу.

Двигун DLE170 має масу 4,4 кг, заявлена максимальна потужність становить 17,5 к.с. при частоті обертання колінчастого валу 7500 хв⁻¹. Виробником позиціонується, як двигун для великих радіокерованих моделей літаків [11]. Питома потужність на рівні 2,98 кВт/кг досягнута, головним чином, завдяки сильному форсуванню за частотою обертання колінчастого валу та максимального облегшення конструкції, зокрема, в конструкції двигуна взагалі не передбачено використання стартеру. Популярність цього двигуна пояснюється, насамперед, тим, що його легко придбати за відносно низьку ціну – 1200 \$.

Двигун SP-210 німецької компанії SkyPower робочим об'ємом 210 см³ має масу 6,6 кг та потужність 17,1 к.с. при частоті обертання колінчастого валу 6000 хв⁻¹ [12]. Питома потужність становить 1,94 кВт/кг. Двигун помірно форсований за частотою

обертання колінчастого валу, а тому відрізняється відносно великим ресурсом роботи за мірками двотактних ДВЗ. Проте, в разі використання в БПЛА класу «боєприпас, що баражує» немає потреби у великому ресурсі роботи. Вартість двигуна становить 3145 євро. Зважаючи на вказане вище, двигун SP-210 є далеко не найбільш поширеним в якості енергетичної установки для БПЛА.

Двигун Hirth 4201 виробником позиціонується на ринку як такий, що «найкращим чином підходить для використання в БПЛА». Двигун відносно невисокої швидкохідності (середня швидкість поршня 8,67 м/с – найнижча серед розглянутих двигунів) та має питому потужність на рівні 1,92 кВт/кг. В конструкції двигуна використовується система впорскування палива, автоматична компенсація висоти та температури, вбудований стартер-генератор потужністю до 1 кВт, а також інтегрований сервопривід для керування [13]. Двигун відрізняється якістю виконання елементів конструкції, проте, за комплексом характеристик для БПЛА класу «боєприпас, що баражує» підходить не найкращим чином, насамперед, через низький рівень питомої потужності та високу вартість.

Двигун DA-215 робочим об'ємом 215 см³ та масою 4,95 кг від американської компанії Desert Aircraft, що спеціалізується на виготовленні двигунів для радіокерованих авіамоделей. Двигун розвиває максимальну потужність 20 к.с. при частоті обертання колінчастого валу 6700 хв⁻¹. Питома потужність становить 3,03 кВт/кг, що є одним з найкращих показників в цьому класі. [14]

Двигуни 3W-342 та 3W-684 мають однакові хід поршня, діаметр циліндру та номінальну частоту обертання колінчастого валу, а відрізняються, по суті, лише кількістю циліндрів. Обидві ці моделі двигунів мають високу питому потужність, що досягається насамперед швидкохідністю – середня швидкість руху поршня є найвищою серед розглянутих в цій роботі двотактних ДВЗ [15, 16].

Найбільша кількість даних у відкритому доступі щодо конструкції та характеристик двотактного ДВЗ для БПЛА Limbach L550E, що може бути пояснено його поширеністю. Двигун MD 550, що використовується на БПЛА Shahed-136, є не ліцензійною копією двигуна Limbach L550E. Двигун чотирициліндровий, з горизонтальним опозитним розташуванням циліндрів, двотактний з кривошипно-камерною продувкою. Облегшення конструкції досягнуто завдяки широкому використанню алюмінієвих сплавів для більшості деталей: циліндр литий з алюмінієвого сплаву з нікасіловим покриттям циліндру; картер литий з алюмінієвого сплаву. Видно, що двигун є достатньо високофорсованим за частотою обертання колінчас-

того валу, чому сприяє невеликий хід поршня. Співвідношення S/D в цього двигуна 0,606 – найменше серед розглянутих ДВЗ. Питома витрата палива 447 г/кВт*год на режимі максимальної потужності при частоті обертання колінчастого валу 7500 хв⁻¹ [17].

Варто відзначити, що вартість двигуна Limbach L550E є найвищою серед розглянутих [18] і більш, ніж в 2 рази перевищує вартість навіть більш потужного двигуна 3W-684.

До недоліків більшості двотактних ДВЗ з кривошипно-камерною продувкою можна віднести суттєве погіршення характеристик двигуна при відхиленні від номінальної частоти обертання колінчастого валу, на яку налаштований двигун. Це в повній мірі характерно і для двигуна Limbach L550E: так, за зовнішньою швидкісною характеристикою при зменшенні частоти обертання колінчастого валу до 5000 хв⁻¹ різко підвищується питома витрата палива до 587 г/(кВт*год), що насамперед, обумовлено погіршенням процесів газообміну та збільшенням частки свіжого заряду, що втрачається на випуск під час продувки циліндру [17].

Проте, цей недолік не обумовлює суттєвого погіршення ТТХ БПЛА типу «боєприпас, що баражує»,

оскільки здебільшого для нього є характерною робота на режимі максимальної потужності.

Невисокий ресурс двотактних двигунів також не відображається негативним чином на ТТХ БПЛА класу «боєприпас, що баражує», оскільки зазвичай потребується робота такого двигуна протягом періоду від декількох мотогодин до декількох десятків мотогодин.

Таким чином, видно, що за сукупністю характеристик саме двотактні ДВЗ найкращим чином підходять для БПЛА класу «боєприпас, що баражує».

4. Дискусія

З наведених вище даних видно, що сучасні тенденції розвитку двигунів для БПЛА спрямовані, насамперед, на вирішення наступних задач: підвищення рівня форсування двигунів, зменшення масо-габаритних характеристик двигунів, зменшення рівня шумності та термічного сліду, зниження питомої ефективної витрати палива, адаптація двигуна до роботи в умовах низького тиску навколишнього середовища, а також забезпечення відносно невисокої вартості двигунів.

Таблиця 2
Характеристики двигунів, що застосовуються для БПЛА класу «боєприпас, що баражує»

Двигун	DLE 170	SP-210	Hirth 4201	DA-215	3W-342	Limbach L 550	3W-684i B4 TS
Потужність, N _e , кВт	13,1	12,8	11	15	23,16	37	44,8
Частота обертання KB, n, хв ⁻¹	7500	6000	6500	6700	6500	7500	6500
Маса двигуна, кг	4,4	6,6	5,7	4,95	8,82	16	16,35
Питома потужність, кВт/кг	2,98	1,94	1,92	3,03	2,63	2,31	2,75
Тактність двигуна	2	2	2	2	2	2	2
Кількість циліндрів	2	2	2	2	2	4	4
Діаметр циліндра, мм	52	55	54	56	66	66	66
Хід поршня, мм	40	45	40	44	50	40	50
Відношення S/D	0,77	0,818	0,741	0,786	0,758	0,606	0,758
Середня швидкість поршня, м/с	10	9	8,67	9,83	10,83	9	10,83
Робочий об'єм, см ³	170	210	183	215	342	548	684
Виробник	Mile Hao Xiang Technology Co, Ltd., Китай	Sky Power International, Німеччина	Hirth Engines, Німеччина	Desert Aircraft, USA	Motoren und flugmodelle, Німеччина	Limbach, Німеччина	Motoren und flugmodelle, Німеччина
Орієнтовна вартість	1200 \$	3145 €	–	2500 \$	5325 €	17700 \$	7820 €

Пріоритетність вказаних задач суттєво відрізняється для різних класів БПЛА, що напряду впливає на засоби їх вирішення та на конструкцію двигуна в цілому.

Для розвідувально-ударних БПЛА оперативно-тактичного рівня однією з найактуальніших задач, що в значному ступені визначає ТТХ БПЛА, є забезпечення великого радіусу дії та часу, що БПЛА здатен безперервно знаходитися в повітрі. Цим обумовлена висока пріоритетність задач щодо зменшення питомої ефективної витрати палива, оскільки, як правило, вага запасу палива на борту суттєво перевищує вагу самого двигуна.

З метою ускладнення вогневого ураження розвідувально-ударних БПЛА оперативно-тактичного рівня ствольною зенітною артилерією противника до них висуваються більш жорсткі вимоги до висотних характеристик. Максимальна висота польоту розвідувально-ударних БПЛА оперативно-тактичного рівня зазвичай лежить в діапазоні 4...8 км, а подекуди може перевищувати 10 км. На таких висотах тиск та щільність повітря суттєво зменшується. Зважаючи на такі умови, для досягнення показників питомої ефективної витрати палива та питомої потужності, що відповідають світовому рівню, доцільним є використання систем газотурбінного наддуву. На сьогодні розроблено ДВЗ БПЛА із тріступеневою системою газотурбінного наддуву, що здатен забезпечити крейсерську висоту польоту БПЛА до 18288 метрів [19]. Проте, настільки висотні БПЛА поки що не набули поширення.

Варто відзначити, що ураження противником розвідувального БПЛА навіть на великій висоті достатньо ймовірне при використанні сучасних зенітно-ракетних комплексів (ЗРК), які для наведення на ціль можуть використовувати тепловий слід БПЛА. Цим обумовлена висока актуальність задачі зі зменшення теплового сліду для висотних БПЛА, що частково вирішується завдяки використанню газотурбінного наддуву (за умови належної теплоізоляції та капотуванню усіх елементів системи), оскільки в турбіні відбирається частина енергії відпрацьованих газів та помітно зменшується їх температура.

Наведеному вище комплексу вимог до двигунів розвідувально-ударних БПЛА великого радіусу дії в найбільшій ступені задовільняють високофорсовані авіаційні дизелі. Форсування дизелів зазвичай виконують за рахунок високого тиску наддуву та водночас достатньо високої середньої швидкості руху поршня. Такий підхід дає змогу досягти дуже низької питомої ефективної витрати палива на рівні 207...210 г/кВт*год при достатньо високому рівні питомої потужності. Більш високий індикаторний ККД дизелів порівняно з бензиновими ДВЗ також є

чинником, що дає змогу досягти додаткового зменшення теплового сліду БПЛА.

Навіть за умов повної відсутності теплового сліду, все одно залишається ймовірність ураження БПЛА на великій висоті за допомогою ЗРК, а тому бажаним є забезпечення його відносно невисокої вартості. Завдяки цьому буде досягнута принаймні економічна недоцільність витрати противником ракети ЗРК з метою ураження висотного БПЛА (оскільки вартість ракети ЗРК може на порядок перевищувати вартість БПЛА, а економічний фактор відіграє важливу роль в сучасних затяжних військових конфліктах «на виснаження»). Саме висока вартість дизелів є одним з головних чинників, що обмежує їх використання в розвідувально-ударних БПЛА великого радіусу дії.

Для БПЛА класу «боєприпас, що баражує» одними з найбільш пріоритетних задач є забезпечення високої питомої потужності та невисокої вартості. Висока питома потужність двигуна дає змогу збільшити корисне навантаження БПЛА. Натомість, вимоги до низької питомої витрати палива не є найбільш пріоритетними, оскільки радіус дії таких БПЛА зазвичай набагато менший. До двигунів БПЛА класу «боєприпас, що баражує» не висувається вимог щодо висотних характеристик, оскільки зазвичай максимальна висота їх польоту не перевищує декількох кілометрів.

В результаті застосування таких БПЛА передбачено їх знищення, а отже вони мають бути дешевими та гарно пристосованими до масового виробництва. Звісно, що за таких умов застосування, вимоги до ресурсу двигуна доволі низькі і становлять лише декілька десятків годин роботи.

Вказана сукупність вимог до двигунів БПЛА класу «боєприпас, що баражує» обумовили надзвичайну популярність бензинових двотактних ДВЗ з кривошипно-камерною продувкою. На сьогоднішній день найбільш поширеною є карбюраторна система живлення оскільки вона більш проста та дешева, навіть незважаючи на її гірші характеристики в порівнянні з системами впорскування палива. Ці двигуни виконуються без агрегатів наддуву, достатньо простими за конструкцією, проте їх рівень питомої потужності може сягати до 3 кВт/кг. Високий рівень питомої потужності забезпечується форсуванням двигуна та максимальним облегшенням його конструкції, як шляхом оптимізації конфігурації деталей так і шляхом впровадження використання нових конструктивних матеріалів. Форсування двигуна виконується, насамперед, за частотою обертання колінчастого валу, що здебільшого обумовлює короткохідність таких ДВЗ, тобто зменшення співвідношення S/D, яке для усіх розглянутих двотактних ДВЗ лежить в межах 0,6...0,8.

Окрім вказаного вище, настільки малі значення співвідношення S/D дають змогу підвищити ефективність процесів газообміну при високій частоті обертання колінчастого валу завдяки збільшенню ефективного прохідного перетину продувочних вікон, а також сприяють покращенню очищенню верхньої частини циліндру від відпрацьованих газів завдяки зменшенню відносної висоти циліндру.

Варто відзначити, що більшу частку часу процеси газообміну в бензинових двотактних ДВЗ відбуваються при одночасно відкритих випускних та продувочних вікнах, а отже, практично неминучими є втрати на випуск частини свіжого заряду, що безумовно є одним з головних чинників, які обумовлюють низьку паливну економічність таких двигунів, оскільки свіжий заряд містить в собі паливо. Втрати свіжого заряду на випуск наприкінці процесу газообміну є достатньо високими, зважаючи на те, що керування газорозподілом в таких ДВЗ здійснюється за допомогою вікон та кромки поршня. Це обумовлює симетричність фаз газорозподілу відносно НМТ, а отже, при русі поршня вверх перекриття випускних вікон відбувається пізніше, ніж продувочних. Рух поршня вверх при перекритті продувочних вікон та частково відкритому випускному вікні сприяє втра-там частини свіжого заряду циліндру на випуск.

На сьогодні достатньо гарно відомі методи мінімізації втрат свіжого заряду на випуск під час продувки в двотактних бензинових ДВЗ з кривошипно-камерною продувкою. Так, ефективним є використання спеціальних камер «резонаторів» у випускній системі, які дають змогу відобразити хвилю високого тиску відпрацьованих газів і забезпечити його повернення до випускного вікна в момент завершення процесу випуску, що і дає змогу суттєво зменшити втрати свіжого заряду циліндру на випуск. Варто відзначити, що цей метод дає змогу ефективно зменшувати втрати свіжого заряду на випуск лише у відносно вузькому діапазоні частоти обертання колінчастого валу, для роботи в якому оптимізовано двигун. На практиці в двотактних бензинових ДВЗ БПЛА класу «боєприпас, що баражує», як правило, доволі рідко використовують камери «резонатори» в системі випуску. Наприклад, дуже поширений БПЛА Shahed-136 має доволі просту випускну систему, що має в своєму складі лише короткі, індивідуальні для кожного циліндру патрубки незмінної площі прохідного перетину без жодних глушників шуму чи інших камер. Цим досягається легкість та компактність конструкції, проте, ціною збільшеної питомої витрати палива та рівня шуму.

Повністю уникнути втрати частини палива на випуск в двотактних бензинових ДВЗ з кривошипно-камерною продувкою можна лише завдяки впровадженню безпосереднього впорскування палива до

циліндру після моменту повного закриття органів газорозподілу. Така система живлення на сьогодні реалізована на деяких двигунах наземної техніки, проте широкого розповсюдження не набула. Безпосереднє впорскування палива обумовлює суттєве збільшення складності та вартості двотактного двигуна. За результатами досліджень такий захід дає змогу збільшити ефективний ККД двигуна з 21 % до 26 % при частоті обертання колінчастого валу 3000 хв^{-1} [20]. Також варто відзначити, що впровадження безпосереднього впорскування ускладнює організацію сумішоутворення, оскільки зменшується час на процес випаровування палива та його рівномірний розподіл за об'ємом камери згоряння, особливо при високій частоті обертання колінчастого валу, яка характерна для усіх бензинових двотактних ДВЗ БПЛА. А отже, така система безпосереднього впорскування палива потребує ретельної оптимізації та налаштувань.

На сьогодні у відкритому доступі немає даних про використання систем безпосереднього впорскування палива на двотактних бензинових ДВЗ БПЛА класу «боєприпас, що баражує». Можна зробити висновки, що це обумовлено надмірним для цього класу БПЛА збільшенням вартості та складності двигуна.

Для ДВЗ БПЛА перспективним напрямком можна вважати інтенсифікацію процесу згоряння палива завдяки додаванню водню до паливно-повітряної суміші [21].

Для двотактних бензинових ДВЗ БПЛА також потенційно найбільш перспективними напрямками розвитку можна вважати заходи спрямовані на оптимізацію процесів газообміну та мінімізацію втрат на випуск свіжого заряду циліндру під час процесу продувки.

Висновки

1. Тип енергетичної установки БПЛА здебільшого визначається вимогами до ТТХ. Електричний двигун із живленням від акумуляторної батареї, зазвичай, здатен забезпечити невеликий радіус дії БПЛА, проте, водночас має набагато менший рівень шуму, вібрацій та теплового сліду, що сприяє зниженню помітності БПЛА. Натомість, ДВЗ дає змогу забезпечити дуже високий радіус дії (до 6500 км.) та час безперервного знаходження БПЛА в повітрі (до 60 годин).

2. Для розвідувально-ударних БПЛА оперативно-тактичного рівня одними з найбільш важливих є показники питомої ефективної витрати палива та питомої ефективної потужності. В таких БПЛА здебільшого використовуються чотиритактні ДВЗ. Питома потужність таких ДВЗ лежить в діапазоні 0,8...1,4 кВт/кг. Важливо відзначити, що для БПЛА дальнього

радіусу дії показники питомої витрати палива в певному сенсі є навіть більш пріоритетними за показники питомої потужності, оскільки маса палива на борту може суттєво перевищувати масу самого двигуна. Зважаючи на таку сукупність вимог до двигунів БПЛА дальнього радіусу дії, відзначається тенденція до поширення використання в них високофорсованих авіаційних дизелів. Для форсування як дизелів так і бензинових двигунів БПЛА цього класу на сьогодні активно використовують газотурбінний наддув, що дає змогу забезпечити високу питому потужність при помірній питомій витраті палива в широкому діапазоні висот експлуатації. Висотні характеристики двигунів також є дуже важливими для забезпечення сучасних ТТХ БПЛА цього класу, бо саме велика висота польоту дає змогу успішно виконувати поставлені задачі, зменшити помітність БПЛА, а також зменшити ймовірність його ураження противником чи принаймні зробити таке ураження економічно не вигідним (в разі необхідності використання ним для ураження ракет сучасних ЗРК). Високий індикаторний ККД ДВЗ БПЛА цього класу в комплексі з використанням газотурбінного наддуву також дають змогу забезпечити зменшення теплового сліду БПЛА, що в свою чергу сприяє зменшенню помітності БПЛА.

3. Для БПЛА класу «боєприпас, що баражує» одними з найбільш важливих є показники питомої потужності при невисокій вартості конструкції в цілому, оскільки в результаті застосування таких БПЛА передбачено їх знищення. Вимоги до питомої витрати палива не є найбільш пріоритетними, оскільки радіус дії таких БПЛА відносно невеликий.

Вказана сукупність вимог до двигунів БПЛА цього класу обумовили надзвичайну популярність двотактних карбюраторних ДВЗ з кривошипно-камерною продувкою. Двотактні ДВЗ БПЛА зазвичай виконуються без агрегатів наддуву, короткохідними (співвідношення S/D в діапазоні $0,6 \dots 0,8$), що сприяє форсуванню двигуна шляхом збільшення частоти обертання колінчастого валу, а також покращує умови процесів газообміну та ефективність очищення верхньої частини циліндру під час процесу продувки. Питома потужність двотактних ДВЗ БПЛА класу «боєприпас, що баражує» може досягати рівня 3 кВт/кг . Високий рівень питомої потужності окрім форсування двигуна забезпечується також завдяки максимальному облегшенню його конструкції.

До недоліків бензинових двотактних ДВЗ БПЛА класу «боєприпас, що баражує» можна віднести, насамперед, достатньо високу питому ефективну витрату палива (приблизно на рівні 450 г/кВт*год), проте варто відзначити, що цей фактор не має сильного негативного впливу на ТТХ БПЛА класу, «боє-

припас, що баражує», зважаючи на його відносно невеликий радіус дії.

Внесок авторів: формулювання задачі – **А. В. Савченко, Д. К. Ободець**; огляд типів енергетичних установок різних класів БПЛА – **А. В. Савченко, Д. К. Ободець**; збір та систематизація інформації щодо конструкції та характеристик ДВЗ сучасних БПЛА – **А. В. Савченко, Д. К. Ободець**; узагальнення та обговорення результатів – **А. В. Савченко**; формулювання висновків – **А. В. Савченко**.

Конфлікт інтересів

Автори повідомляють, що вони не мають конфлікту інтересів щодо цієї публікації, включаючи фінансові, особисті, авторські та інші інтереси, що можуть вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження виконано за грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проєкту № 239/0124 «Поліпшення тактико-технічних характеристик вітчизняних БПЛА шляхом розробки авіаційного двигуна з перспективними показниками питомої потужності».

The research was carried out with the grant support of the National Research Foundation of Ukraine within the framework of the project № 239/0124 "Improving the tactical and technical characteristics of domestic UAVs by developing an aircraft engine with promising specific power indicators".

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Застосування безпілотних літальних апаратів збройними силами російської федерації у війні проти України [Текст] / О. О. Олексенко, О. В. Авраменко, А. В. Федоров, В. В. Сніцаренко, & О. Є. Чернавіна // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2022. – № 4(49). – С. 37-42. DOI: 10.30748/nitps.2022.49.05.

2. Kunertova, D. The war in Ukraine shows the game-changing effect of drones depends on the game [Text] / D. Kunertova // *Bulletin of the Atomic Scientists*. – 2023. – Vol. 79, iss. 2. – P. 95-102. DOI: 10.1080/00963402.2023.2178180.

3. Chávez, K. Emulating underdogs: Tactical drones in the Russia-Ukraine war [Text] / K. Chávez, O. Swed // *Contemporary Security Policy*. – 2023. – Vol. 44, iss. 4. – P. 592-605. DOI: 10.1080/13523260.2023.2257964.

4. Rotax-912 ULS, S [Electronic resource] / Rotax Aircraft Engines. – Access mode: <https://www.flyrotax.com/products/912-uls-s> (accessed 15 September 2024).

5. Перелік даних сертифікату типу TD 0061. Видання 02 [Електронний ресурс]. – Державна авіаційна служба України, 2016. – 7 с. – Режим доступу: https://avia.gov.ua/wp-content/uploads/2019/02/TCDs_TD_0061_Rotax_914.pdf (дата звернення: 15.09.2024).

6. Rotax-914 UL, F [Electronic resource] / Rotax Aircraft Engines. – Access mode: <https://www.flyrotax.com/products/914-ul-f> (accessed 15 September 2024).

7. Rotax-916 IS A, ISC A, ISC24 [Electronic resource] / Rotax Aircraft Engines. – Access mode: <https://www.flyrotax.com/products/916-is-c> (accessed 15 September 2024).

8. Operator's Manual Lycoming O-320 Series. 3rd Edition [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.lycoming.com/sites/default/files/attachments/O-320%2520Operator%2520Manual%252060297-30.pdf> (accessed 15 September 2024).

9. TEI-PD170 Turbodiesel aviation engine [Electronic resource]. – Access mode: https://www.tei.com.tr/uploads/docs/1599124264_teipd170turbodieselaviationengine.pdf (accessed 15 September 2024).

10. DEL-120 Engine [Electronic resource] / Lycoming Engines. – Access mode: <https://www.lycoming.com/engines/del-120> (accessed 15 September 2024).

11. DLE170 Engine [Electronic resource] / Mile Hao Xiang Technology Co, Ltd. – Access mode: <https://www.dlengine.com/en/rcengine/dle170/> (accessed 19 September 2024).

12. SP-210 Engine Series [Electronic resource] / Sky Power GmbH. – Access mode: <https://skypower.online/product-category/sp-210-series/> (accessed 19 September 2024).

13. Hirth 42 Engine Series [Electronic resource] / Hirth Engines. – Access mode: <https://hirthengines.com/2-stroke-engines/42-series/> (accessed 19 September 2024).

14. DA-215 Twin Gas Engine [Electronic resource] / Desert Aircraft. – Access mode: <https://www.chiefaircraft.com/da-215.html> (accessed 19 September 2024).

15. 3W-342i B2 TS CS [Electronic resource] / 3W Professional GmbH. – Access mode: <https://3w-modellmotoren.de/produkt/3w-342i-b2-ts-cs/?lang=en> (accessed 19 September 2024).

16. 3W-684i B4 TS [Electronic resource] / 3W Professional GmbH. – Access mode: <https://3w-modellmotoren.de/produkt/3w-684i-b4-ts/?lang=en> (accessed 19 September 2024).

17. Limbach L 550 E, Datasheets [Electronic resource] / Limbach Flugmotoren GmbH & Co.KG. – Access mode: <https://limflug.de/downloads/datasheets/L550-E-datasheet-en.pdf> (accessed 19 September 2024).

18. Limbach L 550 E UAV Engine 37KW/50HP Optional E/Starter & Generator/Alternator (Global Warehouse) [Electronic resource] / Austars Model. – Access mode: https://www.austars-model.com/limbach-l-550-e-uav-engine-37kw50hp-optional-estarter-generatoralternator_g7210.html (accessed 19 September 2024).

19. Kang, Y. S. Multi-stage turbocharger system analysis method for high altitude UAV engine [Text] / Y. S. Kang, B. J. Lim, & B. J. Cha // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2017. – Vol. 31. – P. 2803-2811. DOI: 10.1007/s12206-017-0523-4.

20. Padala, S. Studies on an Air Assisted Gasoline Direct Injection System for a Two-Stroke Engine [Electronic resource] / S. Padala, A. Bansal, & A. Ramesh // *SAE Technical Paper 2008-28-0048*. – 2008. DOI: 10.4271/2008-28-0048.

21. Марченко, А. П. Дослідження параметрів згоряння бензину з добавкою водню в двигуні з іскровим запалюванням на режимах зовнішньої швидкісної характеристики [Текст] / А. П. Марченко, & М. Т. Міценко // *Двигуни внутрішнього згоряння*. – 2024. – № 1. – С. 52–60. DOI: 10.20998/0419-8719.2024.1.07.

References

1. Oleksenko, O. O., Avramenko, O. V., Fedorov, A. V., Snitsarenko, V. V., & Chernavina, O. Ye. Zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh apparativ zbroinymy sylamy rosiiskoi federatsii u viini pro-ty Ukrainy. [The use of unmanned aerial vehicles by the armed forces of the Russian Federation in the war against Ukraine]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy – Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, 2022, no. 4 (49), pp. 37-42. DOI: 10.30748/nitps.2022.49.05. (In Ukrainian).

2. Kunertova, D. The war in Ukraine shows the game-changing effect of drones depends on the game, *Bulletin of the Atomic Scientists*, 2023, vol. 79, iss. 2, pp. 95-102. DOI: 10.1080/00963402.2023.2178180.

3. Chávez, K., & Swed, O. Emulating underdogs: Tactical drones in the Russia-Ukraine war, *Contemporary Security Policy*, 2023, vol. 44, iss. 4, pp.

592-605. DOI: 10.1080/13523260.2023.2257964.

4. Rotax-912 ULS, S. Rotax Aircraft Engines. Available at: <https://www.flyrotax.com/products/912-uls-s> (accessed 15 September 2024).

5. *Perelik danykh sertyfikatu typu TD 0061 Vydannya 02* [List of certificate data type TD 0061]. Derzhavna aviatsiyna sluzhba Ukrainy, 2016. 7 p. Available at: https://avia.gov.ua/wp-content/uploads/2019/02/TCDS_TD_0061_Rotax_914.pdf (accessed 15 September 2024). (In Ukrainian).

6. Rotax-914 UL, F. Rotax Aircraft Engines. Available at: <https://www.flyrotax.com/products/914-ul-f> (accessed 15 September 2024).

7. Rotax-916 IS A, ISC A, ISC24. Rotax Aircraft Engines. Available at: <https://www.flyrotax.com/products/916-is-c> (accessed 15 September 2024).

8. *Operator's Manual Lycoming O-320 Series. 3rd Edition*. Available at: <https://www.lycoming.com/sites/default/files/attachments/O-320%2520Operator%2520Manual%252060297-30.pdf> (accessed 15 September 2024).

9. TEI-PD170 Turbodiesel aviation engine. Available at: https://www.tei.com.tr/uploads/docs/1599124264_teipd170turbodieselaviationengine.pdf (accessed 15 September 2024).

10. DEL-120 Engine. Lycoming Engines. Available at: <https://www.lycoming.com/engines/del-120> (accessed 15 September 2024).

11. DLE170 Engine. Mile Hao Xiang Technology Co, Ltd. Available at: <https://www.dlen-gine.com/en/rcengine/dle170/> (accessed 19 September 2024).

12. SP-210 Engine Series. Sky Power GmbH. Available at: <https://skypower.online/product-category/sp-210-series/> (accessed 19 September 2024).

13. Hirth 42 Engine Series. Hirth Engines. Available at: <https://hirthengines.com/2-stroke-engines/42-series/> (accessed 19 September 2024).

14. DA-215 Twin Gas Engine. Desert Aircraft. Available at: <https://www.chiefaircraft.com/da-215.html> (accessed 19 September 2024).

15. 3W-342i B2 TS CS. 3W Professional GmbH. Available at: <https://3w-modellmotoren.de/produkt/3w-342i-b2-ts-cs/?lang=en> (accessed 19 September 2024).

16. 3W-684i B4 TS. 3W Professional GmbH. Available at: <https://3w-modellmotoren.de/produkt/3w-684i-b4-ts/?lang=en> (accessed 19 September 2024).

17. Limbach L 550 E, Datasheets. Limbach Flugmotoren GmbH & Co.KG. Available at: <https://lim-flug.de/downloads/datasheets/L550-E-datasheet-en.pdf> (accessed 19 September 2024).

18. Limbach L 550 E UAV Engine 37KW/50HP Optional E/Starter & Generator/Alternator (Global Warehouse). Austars Model. Available at: https://www.austars-model.com/limbach-l-550-e-uav-engine-37kw50hp-optional-estarter-generatoralternator_g7210.html (accessed 19 September 2024).

19. Kang, Y. S., Lim, B. J., & Cha, B.J. Multi-stage turbocharger system analysis method for high altitude UAV engine. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, vol. 31, pp. 2803–2811. DOI: 10.1007/s12206-017-0523-4.

20. Padala, S., Bansal, A., & Ramesh, A. Studies on an Air Assisted Gasoline Direct Injection System for a Two-Stroke Engine. *SAE Technical Paper 2008-28-0048*, 2008. DOI: 10.4271/2008-28-0048.

21. Marchenko, A. P., & Mishchenko, M. T., Doslidzhennia parametriv zghoriannia benzynu z dobavkoiu vodniu v dvyhuni z iskrovym zapaliuvanniam na rezhymakh zovnishnoi shvydkisnoi kharakterystyky. [Research of the combustion parameters of gasoline with additional hydrogen in a spark-ignition engine in external speed characteristic modes]. *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia – Internal Combustion Engines*, 2024, no. 1, pp. 52-60. DOI: 10.20998/0419-8719.2024.1.07. (In Ukrainian).

Надійшла до редакції 10.09.2024, розглянута на редколегії 15.10.2024

CURRENT TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF ENGINES FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE

Anatolii Savchenko, Dmytro Obodets

The **subject** of this study is the current state and prospects for the development of the market for unmanned aerial vehicles (UAVs) and power plants. The **purpose** of this work was to identify trends in the development of UAV engines of various classes. **Task**: collection, systematization, and analysis of information on the most common engines of reconnaissance and strike UAVs of the operational-tactical level, as well as UAVs of the "barrage ammunition" class. This article provides a brief description of various types of UAV power plants, and their main advantages and disadvantages are given, which are often decisive when choosing the type of power plant for a specific UAV. It was found that a power plant with an internal combustion engine (ICE) is best suited for use in medium- and long-range UAVs. This study demonstrated that four-stroke internal combustion engines are most commonly used in reconnaissance-strike UAVs at both operational and tactical levels. The features of the design and characteristics of four-stroke

internal combustion engines, which have become the most widely used UAVs, are described. It was determined that the introduction of turbocharging or increasing the pressure is the main means of forcing four-stroke internal combustion engines, which makes it possible to simultaneously achieve high specific power and high brake efficiency of the engine over a wide range of altitudes during its operation. It is shown that one of the most important tasks for a long-range UAV engine is to reduce the specific brake fuel consumption. Thus, there is a tendency to promote the use of high-powered aviation diesels in long-range UAVs. It was determined that the main requirements for UAV engines of the "barrage ammunition" class are high specific power, low cost and adaptability to mass production. This study shows that gasoline two-stroke internal combustion engines with crank-chamber scavenging are extremely widespread in UAVs of the "barrage ammunition" class. The design features and characteristics of UAV two-stroke internal combustion engines are described. The main means of ensuring high specific power of such two-stroke internal combustion engines are increasing the engine RPM, optimizing gas exchange processes, and reducing the weight of the construction by using new materials. **Conclusion.** The results show that depending on the UAV type, the set of engine requirements can vary significantly. Modern trends in the development of UAV engines of various classes have been determined. Potentially promising directions for increasing the efficiency of engines and for comprehensive improvement of their indicators and characteristics have been determined.

Keywords: internal combustion engine; unmanned aerial vehicle; specific power; turbocharging; scavenging process; specific fuel consumption.

Савченко Анатолій Вікторович – канд. техн. наук, старш. викл. каф. двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

Ободець Дмитро Костянтинович – асп. каф. двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

Anatolii Savchenko – Candidate of Technical Science, Senior Teacher at the Department of Engines and Hybrid Power Plants of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: Savchenko.sci@gmail.com, ORCID: 0009-0001-0233-6072, Scopus Author ID 57219438401.

Dmytro Obodets – Ph.D. Student of the Department of Engines and Hybrid Power Plants of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: obodetsdk@gmail.com, ORCID: 0009-0009-8857-3236.