

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ лісового і садово-паркового господарства**

УДК 674.06:623.74

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ
Лісового і садово паркового
господарства
Роман ВАСИЛИШИН

(підпис) (ПБ)
« _____ » _____ 2024 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
Технологій та дизайну виробів з
деревини
Андрій СПІРОЧКІН

(підпис) (ПБ)
« _____ » _____ 2024 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Обґрунтування можливості використання комплектуючих з деревини в БПЛА

Спеціальність 187 «Деревообробні та меблеві технології»

Освітня програма «Деревообробні та меблеві технології»

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Гарант освітньої програми

канд. техн. наук, доц.
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Андрій СПІРОЧКІН
(ПБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

канд. техн. наук, доц.
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Андрій СПІРОЧКІН
(ПБ)

Виконав

(підпис)

Любомир ШОЙМУ
(ПБ)

Київ – 2024 рік

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ННІ лісового і садово-паркового господарства

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Технологій та дизайну виробів з деревини

К.Т.Н., доц. _____ Андрій СПИРОЧКІН

науковий ступінь, вчене звання (підпис) (ПІБ)

« _____ » _____ 2023 р.

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
СТУДЕНТУ**

Шойму Любомиру Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 187 «Деревообробні та меблеві технології»

(код і назва)

Освітня програма «Деревообробні та меблеві технології»

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи Обґрунтування можливості використання комплектуючих з деревини в БПЛА

затверджена наказом ректора НУБіП України від “31” 10 2023 р. № 1981 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи

Звіти з наукової роботи кафедри. Результати попередніх експериментальних досліджень за обраною тематикою

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз конструкції сучасних БПЛА

2. Характеристика матеріалів, які використовуються для виготовлення корпусів БПЛА

3. Аналіз можливості застосування деревинних матеріалів для виготовлення елементів БПЛА

Дата видачі завдання “ _____ ” _____ 20__ р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

(прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ СУЧАСНИХ БПЛА.....	9
1.1. Огляд конструкцій сучасних БПЛА.....	9
1.2. Аналіз матеріалів, які використовуються для виготовлення корпусів БПЛА.....	15
1.3. Аналіз властивостей матеріалів, які впливають на можливість їх використання для виготовлення елементів корпусів БПЛА.....	19
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕРЕВИНИ ТА ДЕРЕВИНОКОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ, ЩО ВПЛИВАТИМУТЬ НА МОЖЛИВІСТЬ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОРПУСІВ БПЛА.....	25
РОЗДІЛ 3 ПРИЙНЯТТЯ ПРОЕКТНОГО РІШЕННЯ У ВИБОРІ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ БПЛА.....	29
3.1. Прийняття проектних рішень.....	29
3.2. Рішення багатокритеріальної задачі методом аналізу ієрархій.....	42
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ФІЗИЧНИХ І ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ БПЛА.....	49
ВИСНОВКИ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	60

РЕФЕРАТ

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Основна частина викладена на 64 сторінках, проілюстрована 25 рисунками та 23 таблицями. Список використаних джерел містить 47 найменувань.

У вступі обґрунтовано актуальність використання деревини як альтернативного матеріалу для виготовлення компонентів безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Висвітлено мету, завдання дослідження, а також практичне значення результатів.

У першому розділі проведено огляд конструкції сучасних БПЛА, Проведено аналіз матеріалів, які використовуються для виготовлення корпусів БПЛА та визначено ключові властивості матеріалів, які впливають на можливість їх використання для виготовлення елементів корпусів БПЛА.

У другому розділі проведено аналіз властивостей деревини та деревинно-композиційних матеріалів, що впливатимуть на можливість їх користування для виготовлення елементів корпусів БПЛА. Проаналізовано такі матеріали як береза, павловнія та граб, карбон та фанера.

У третьому розділі пропонуємо та реалізовано методику вибору матеріалів для виготовлення компонентів БПЛА із застосуванням методу аналізу ієрархій. Розроблено критерії оцінки, здійснено порівняння матеріалів на їх відповідність поставленим вимогам, а також обґрунтовано доцільність використання деревини для конкретних конструктивних елементів.

У четвертому розділі проведено експериментальні дослідження, спрямовані на перевірку придатності деревинно-композиційних матеріалів для виготовлення конструкційних елементів БПЛА. Детально описано методику проведення досліджень. Результати експериментів дозволили оцінити ефективність застосування деревини в реальних умовах експлуатації. Особливу увагу приділено аналізу отриманих характеристик матеріалів, порівнянню їх із традиційними матеріалами, які використовують для БПЛА, і визначенню оптимальних варіантів для виготовлення рами квадрокоптера. Виготовлено раму

каркасного типу та проведено дослідження міцності на згин. Досліджено вібраційні властивості рам з карбону та ХДФ.

Ключові слова: БПЛА, деревина, ХДФ, карбон, фізико-механічні властивості.

ВСТУП

Швидкий розвиток безпілотників відкриває нові перспективи для застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у різних сферах людської діяльності. Одним із актуальних напрямів досліджень є пошук нових матеріалів для виготовлення компонентів БПЛА, які б забезпечували оптимальне співвідношення міцності, легкості та вартості. Деревина, як природний матеріал з унікальними властивостями, все частіше розглядається як перспективний матеріал для створення окремих елементів конструкції БПЛА.

Обґрунтування можливості використання комплектуючих з деревини в БПЛА зумовлена кількома факторами. По перше, деревина як матеріал відрізняється низькою вартістю від металевих та інших аналогів, що дозволяє зменшити загальну собівартість БПЛА. По друге, деревина має малу вагу і при цьому достатню міцність, що зменшує загальну масу літального апарату та збільшення тривалості польоту. Також деревина є екологічним матеріалом, що забезпечує можливість утилізації без шкоди для довкілля, на відміну від багатьох синтетичних матеріалів.

Використання деревини в конструкціях БПЛА актуалізується з огляду на нові досягнення в обробці деревини, зокрема методи, що підвищують її довговічність та міцність. Сучасні технології дозволяють створювати дерев'яні композити, які за своїми характеристиками можуть конкурувати з легкими металами та синтетичними матеріалами. Це дає змогу розширити функціональні можливості БПЛА, зберігаючи при цьому баланс між витратами, масою і міцністю.

Актуальність також зумовлена зростаючою потребою в оперативному виробництві літальних апаратів в умовах української війни з доступних матеріалів у контексті швидкої модифікації та оновлення техніки. Деревина дозволяє виготовляти різноманітні деталі без складних виробничих процесів, що може бути особливо корисним у випадках, коли необхідна масова або швидка заміна запчастин у польових умовах. В умовах дефіциту спеціалізованих

матеріалів, деревина виступає ефективною альтернативою, адже її можна легко транспортувати, зберігати та обробляти навіть в обмежених умовах.

Зростання запиту на БПЛА для цивільних і військових цілей стимулює пошук альтернативних матеріалів, які б підвищували доступність та ефективність. У цьому контексті деревина виступає перспективним матеріалом, особливо для виготовлення одноразових або експериментальних БПЛА, де витрати на комплектуючі мають велике значення. З іншого боку, застосування деревини вимагає додаткових досліджень її стійкості до вологи, температури та механічних навантажень, що робить тему актуальною для наукових розробок і випробувань.

Метою даної роботи є теоретичне обґрунтування можливості використання деревини як конструкційного матеріалу для виготовлення окремих компонентів БПЛА, а також аналіз переваг і недоліків такого рішення.

Об'єктом дослідження є безпілотні літальні апарати (БПЛА) та їх конструкційні матеріали.

Предметом дослідження є можливості використання деревини як конструкційного матеріалу для виготовлення окремих компонентів БПЛА.

Наукова новизна роботи полягає в комплексному аналізі потенціалу використання деревини в безпілотниках, розробці концептуальної моделі БПЛА з дерев'яними компонентами та обґрунтуванні перспектив розвитку цього напрямку.

Результати дослідження можуть бути використані для розробки нових конструкцій БПЛА з використанням дерев'яних компонентів, що дозволить знизити вартість виробництва, підвищити екологічність і розширити сферу застосування безпілотних систем.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ СУЧАСНИХ БПЛА

1.1. Огляд конструкцій сучасних БПЛА

БПЛА літакового типу БПЛА (рис. 1.1) мають фіксовані крила, подібні до традиційних літаків, що дозволяє їм досягти великої відстані з мінімальною витратою енергії. Вони зазвичай запускаються з розбігу або за допомогою катапульти, а деякі моделі можуть оснащуватися додатковими вертикальними двигунами для вертикального польоту та посадки.

Основні частини БПЛА літакового типу:

крило – забезпечує підйомну силу під час горизонтального польоту. Розмах і профіль крила залежать від конкретних завдань. Деякі моделі можуть мати подовжені крила для підвищення ефективності.

Фюзеляж – головна частина конструкції, в якій розташовані основні системи та вантаж. Зазвичай має аеродинамічну форму для зниження опори повітря.

Хвостове оперування – стабілізує апарат у повітрі та складається з горизонтальних і вертикальних стабілізаторів.

Двигун та пропелери – забезпечує тягу для горизонтального польоту. Двигун розташовується на задній або передній частині фюзеляжу.

Шасі – Використовується для зльоту, посадки та руху по землі (не у всіх моделях).

Авіоніка та контролер польоту – включає комп'ютер, сенсори (гіроскопи, акселерометри) і GPS для стабілізації та керування. Контролер польоту відповідає стабілізації та регулюванню обертання роторів.

Система живлення – традиційна батарея великої ємності, яка забезпечує живлення двигунів та авіоніки [1].



Рис: 1.1. Конструкція БПЛА літакового типу

БПЛА вертолітного типу (рис. 1.2), як правило, оснащений одним або кількома роторами, подібно до звичайного вертольота. Основний ротор надає апарату підйомну силу, а хвостовий (або бічні ротори) стабілізують положення в польоті. Вони можуть зробити вертикальний зліт і посадку, що робить їх дуже зручними для роботи в обмежених умовах.

Основні елементи конструкції:

фюзеляж – містить основні системи, такі як живлення, управління та додаткове обладнання. Має аеродинамічну форму для зниження опору.

Основний ротор – забезпечує підйомну силу та керованість у вертикальній площині. Складається з кількох лопатей, які обертаються навколо центральної осі.

Хвостовий ротор (або бокові ротори) – стабілізує БПЛА, запобігаючи його обертанню навколо власної осі, а також може допомогти в поворотах і зміні напрямку польоту.

Шасі – традиційно представляє собою посадкові ліжі або колеса для забезпечення стабільної посадки.

Авіоніка та контролер польоту – включає комп'ютер, сенсори (гіроскопи, акселерометри) і GPS для стабілізації та керування. Контролер польоту відповідає стабілізації та регулюванню обертання роторів.

Система живлення – традиційна батарея великої ємності, яка забезпечує живлення двигунів та авіоніки [2].



Рис: 1.2. Конструкція БПЛА вертолітного типу.

Мультироторні БПЛА (рис. 1.3) мають кілька горизонтальних роторів найчастіше 4, 6 або 8, які спільно працюють для забезпечення стабільності та маневреності. Вони можуть злітати, сідати та зависати на місці, що робить їх ідеальними для детального спостереження на коротких відстанях.

Рама та промені – скелет БПЛА. Зазвичай виготовлено з легких, але міцних матеріалів, таких як вуглецеве волокно або алюміній.

Електродвигуни – використовують для керування швидкістю обертання пропелерів та змінювати напрямок польоту. Потужність двигунів підбирається відповідно до ваги та вимог до апарату.

Пропелери – використовуються для підйому та стабілізації дрона кожен із яких має незалежний двигун. Кожен ротор спрямований вертикально та створює підйомну силу.

Авіоніка та контролер польоту – включає комп'ютер, сенсори (гіроскопи, акселерометри) і GPS для стабілізації та керування. Контролер польоту відповідає стабілізації та регулюванню обертання роторів.

Система живлення – традиційна батарея великої ємності, яка забезпечує живлення двигунів та авіоніки [3].

Мультироторні БПЛА за конструкцією класифікують на: трикоптери (рис.1.3) – використовують три двигуни [4].



Рис. 1.3. Конструкція БПЛА мультироторного типу, трикоптер [5]

Квадрокоптери – на даний час найпоширеніший тип дронів, який використовує чотири двигуни для польоту, вони легкі, ними легко керувати і можна використовувати для зйомки відео (рис. 1.4) та швидкісного польоту (рис. 1.5) [6].



Рис. 1.4. Кострукція БПЛА мультироторного типу. Квадрокоптер Mavic 3 [7]



Рис. 1.5. Кострукція БПЛА мультироторного типу. Квадрокоптер, FPV [8]

Гексакоптери (рис. 1.6) – схожі на квадрокоптер але використовують шість двигунів для польоту. Стійкіші в повітрі та мають більшу підйомну вагу [9].



Рис. 1.6. Кострукція БПЛА мультироторного типу. Гексакоптер [10]

Октокоптер (рис. 1.7) – схожі на квадрокоптери але використовують вісім двигунів для польоту, вони набагато більші та важчі за квадрокоптери, відповідно можуть переносити більше корисне навантаження [11].



Рис. 1.7. Кострукція БПЛА мультироторного типу. Октокоптер [12]

Також існують гібридні БПЛА які поєднують характеристики літакового й мультироторного типів, що дозволяють їм витримувати вертикальний зліт і посадку, але при цьому вони оснащені крилами для більш ефективного польоту на довгих відстанях [13].

Конструкції БПЛА постійно вдосконалюються, щоб задовольнити вимоги різних сфер застосування – від цивільного до військового. Кожен із представлених типів має свої переваги та недоліки, а вибір конкретного типу БПЛА залежить від конкретних завдань, які перед ними стоять.

1.2. Аналіз матеріалів, які використовуються для виготовлення корпусів БПЛА

Вибір матеріалу для корпусу БПЛА є критичним рішенням, оскільки він безпосередньо впливає на вагу, міцність, жорсткість, аеродинамічні характеристики та вартість апарату. Оптимальний матеріал залежить від конкретного призначення БПЛА, його розміру та умов експлуатації.

Основні вимоги до матеріалів для корпусів БПЛА:

Легкість – чим легший корпус, тим більше корисне навантаження може нести БПЛА та більш тривалий час перебувати в повітрі.

Міцність – Матеріал повинен витримувати навантаження під час польоту, включаючи вібрації, удари та зміни температури.

Жорсткість – жорсткий корпус забезпечує стабільність польоту та мінімізує деформації під навантаженням.

Стійкість до зовнішніх впливів – матеріал повинен бути стійким до впливу ультрафіолетового випромінювання, вологи, хімікатів та інших агресивних середовищ.

Простота обробки – матеріал повинен легко піддаватися обробці, що дозволяє виготовляти деталі складної форми.

Вартість матеріалу та процесу виробництва також є важливим фактором.

Найпоширеніші матеріали для корпусів БПЛА: композитні матеріали: склопластик (рис. 1.8) активно використовується в конструкції безпілотних літальних апаратів (БПЛА) завдяки його легкості, міцності та доступній вартості.

Він є композитним матеріалом, що складається з волокон скла, просочених полімерною смолою, що забезпечує високу міцність при малій вазі. Це дозволяє БПЛА витримувати значні аеродинамічні навантаження без збільшення загальної маси апарата, що є критичним для підвищення тривалості польоту та маневреності. Склопластик також має стійкість до корозії та впливу вологи, що підвищує його надійність в умовах різних кліматичних умов. Завдяки своїй гнучкості у виробництві склопластик підходить для створення різноманітних форм і деталей, від корпусу до елементів крила, що дає можливість адаптувати конструкцію під специфічні вимоги та задачі [14].



Рис. 1.8. Корпус БПЛА з склопластику та деревини [15]



Рис. 1.9. Корпус БПЛА з карбону [17]

Карбон або вуглепластик (рис 1.9), є популярним матеріалом для створення конструкцій безпілотних літальних апаратів (БПЛА) завдяки його

надзвичайній міцності при мінімальній вазі. Він складається з вуглецевих волокон, переплетених і просочених полімерною смолою, що надає матеріалу високу жорсткість і витривалість до механічних навантажень, зберігаючи при цьому легкість. Карбон забезпечує БПЛА високу аеродинамічну ефективність і дозволяє досягти великих швидкостей та високої маневреності, що є ключовими характеристиками для розвідувальних і тактичних безпілотників. Він також має стійкість до впливу високих температур, корозії і вібрацій, що підвищує надійність апарата в екстремальних умовах. Карбон широко використовується для виготовлення рам, корпусів і лопатей пропелерів, що дозволяє створювати надійні, довговічні і легкі конструкції, здатні витримувати тривалі польоти та інтенсивні маневри [16].



Рис. 1.10. Корпус БПЛА з використанням пінопласту [19]

Пінопласт (рис. 1.10) широко використовується в безпілотних літальних апаратах (БПЛА) через свою легкість, простоту обробки та низьку вартість. Його застосовують здебільшого для виготовлення корпусів, крил та інших великих деталей, оскільки він дозволяє знизити загальну вагу апарата, що сприяє підвищенню тривалості польоту. Пінопласт має хороші амортизаційні властивості, що допомагає поглинати удари та вібрації, захищаючи електронні компоненти БПЛА [18].

Цей матеріал також забезпечує достатню міцність для стабільного польоту, особливо в невеликих і легких дронах, які використовуються для рекреаційних або навчальних цілей. Пінопласт легко піддається модифікаціям, що дозволяє швидко вносити зміни у конструкцію апарата і здійснювати ремонт пошкоджених деталей з мінімальними затратами.

Алюміній (рис. 1.11) є не дуже популярним матеріалом для створення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) через його вагу. Попри це йому властиві висока міцність та стійкість до корозії. Алюміній також витримує високі механічні навантаження, що є важливим для деталей, схильних до інтенсивних вібрацій, як от рами, корпуси. Його термостійкість робить матеріал надійним у різних кліматичних умовах, захищаючи електроніку БПЛА від перегріву та зовнішніх впливів. Крім того, алюміній легко піддається обробці, що полегшує виготовлення та ремонт деталей, дозволяючи швидко адаптувати конструкцію до специфічних потреб і задач безпілотника [20].



Рис. 1.11. Корпус БПЛА з використанням алюмінію

Деревина (рис. 1.12) є привабливим матеріалом для виготовлення одноразових або недорогих БПЛА завдяки своїм фізичним властивостям: високий коефіцієнт міцності на одиницю ваги та природна гнучкість. Вона має добрі демпфувальні характеристики, що дозволяє поглинати значну частину вібрацій і ударів, захищаючи чутливі електронні компоненти всередині апарата, особливо під час зльоту, посадки чи випадкових зіткнень. Завдяки своїй

здатності витримувати навантаження, деревина підходить для створення крил і корпусів, які мають стабільну форму та можуть протистояти деформації, водночас зберігаючи малу вагу [21].

В умовах війни деревина є доступним і легко оброблюваним матеріалом, що робить її ідеальним для швидкого і дешевого виготовлення одноразових дронів. Застосування деревини дозволяє створювати прості конструкції з мінімальними витратами, які можна масово виготовляти з доступних ресурсів без потреби в спеціалізованих виробничих потужностях. Це особливо важливо для одноразових дронів-камікадзе або розвідувальних апаратів, що виконують завдання з високим ризиком втрати. Деревина також має низьку теплопровідність, що зменшує її теплову сигнатуру та ускладнює виявлення таких дронів тепловізорами, надаючи їм перевагу в умовах сучасної війни.



Рис. 1.12. Крило БПЛА з деревини [22]

Вибір матеріалу для корпусу БПЛА є складним завданням, яке вимагає врахування багатьох факторів. Сучасні технології дозволяють використовувати широкий спектр матеріалів, що дозволяє створювати БПЛА з оптимальними характеристиками для конкретних завдань.

1.3. Аналіз властивостей матеріалів, які впливають на можливість їх використання для виготовлення елементів корпусів БПЛА

Склопластик як доступний, легкий та універсальний матеріал.

Легкість і міцність – Склопластик є композитом із волокон скла та полімерної смоли, що забезпечує поєднання високої міцності з малою вагою. Це дозволяє конструкціям витримувати великі механічні навантаження, зокрема аеродинамічні сили, без збільшення загальної ваги апарату. Легкість склопластику особливо важлива для дронів, які потребують оптимального співвідношення ваги та підйомної сили для збільшення тривалості польоту та маневреності.

Стійкість до корозії та зовнішніх впливів – склопластик має високу стійкість до вологи, корозії та дії ультрафіолетового випромінювання. Це особливо важливо для дронів, які використовуються в умовах високої вологості, морського клімату або на великих висотах, де вплив сонця є більш інтенсивним.

Гнучкість у виробництві – склопластик легко формується у складні деталі, що дозволяє створювати різноманітні форми корпусів БПЛА, включаючи обтічні контури для зниження опору повітря. Це особливо актуально для апаратів, де важлива аеродинаміка та зменшення енергетичних витрат під час польоту.

Низька вартість і доступність – порівняно з вуглепластиком, склопластик є дешевшим, що дозволяє знизити загальні витрати на виробництво БПЛА. Це робить його привабливим виробом для масового виробництва недорогих дронів, які можуть бути використані у великих кількостях.

Електромагнітна сумісність – склопластик є діелектриком і не створює перешкод для електромагнітних хвиль. Це дозволяє ефективно використовувати його у конструкціях дронів, які мають численні сенсори, антени або інші пристрої, чутливі до електромагнітних сигналів. Завдяки своїй прозорості до радіохвиль, склопластик не впливає на роботу GPS, зв'язку чи систем управління БПЛА, що є важливим для стабільної роботи апарату у різних умовах [23].

Карбон – матеріал із високою міцністю і мінімальною вагою.

Висока жорсткість і міцність – Карбон складається з переплетених вуглецевих волокон, просочених полімерною смолою, що забезпечує надзвичайну міцність і жорсткість при мінімальній вазі. Це дозволяє

використовувати його для дронів, які піддаються високим механічним навантаженням під час швидкісних польотів або виконання складних маневрів.

Аеродинамічна ефективність і мінімальний опір – карбонові корпуси можна формувати у гладкі обтічні форми, що мінімізує опір повітря. Це дозволяє досягти більших швидкостей та підвищує маневреність, що особливо важливо для розвідувальних дронів, які мають швидко реагувати на зміну ситуації [24].

Стійкість до високих температур – карбон має високу термостійкість, що забезпечує стабільність конструкції навіть при значних перегрівих, наприклад, в умовах високої сонячної радіації або під час експлуатації в жаркому кліматі [25].

Стійкість до корозії, вібрацій та ударів – карбонові композити не піддаються корозії, що є великою перевагою для дронів, які працюють у вологому середовищі або зазнають механічних ударів. Завдяки цій властивості карбон забезпечує довговічність корпусу навіть при інтенсивній експлуатації в умовах значного навантаження.

Електромагнітна сумісність – карбон володіє високою електропровідністю, що може створювати деякі перешкоди для роботи антен та інших електронних пристроїв. У конструкціях, де використовують карбон, необхідно ретельно розташовувати антени та інші чутливі до електромагнітних хвиль пристрої, щоб уникнути екранування сигналу. У деяких випадках застосовують додаткові матеріали для ізоляції чи віддалення антен від основної структури з карбону [26].

Пінопласт для полегшення та амортизації конструкції.

Надзвичайно мала вага – пінопласт – це один із найлегших матеріалів, що дозволяє суттєво зменшити загальну вагу дрона, тим самим забезпечуючи більшу дальність польоту та підвищену енергоефективність. Це особливо актуально для легких моделей, таких як навчальні або рекреаційні дрони.

Амортизаційні властивості – пінопласт добре поглинає удари та вібрації, захищаючи електронні компоненти від механічних навантажень, які можуть виникати під час приземлення чи аварійного зіткнення. Це робить пінопласт

ідеальним матеріалом для корпусів невеликих, але чутливих до пошкоджень дронів.

Простота обробки та можливість швидкої модифікації – пінопласт легко піддається обробці та дозволяє швидко виготовляти нові конструкції або здійснювати ремонт корпусу в разі пошкоджень. Це важливо для одноразових моделей або прототипів, які можуть потребувати частого доопрацювання.

Економічність – пінопласт є дешевим матеріалом, що знижує загальні витрати на виробництво. Це робить його актуальним для виготовлення моделей, призначених для навчання, рекреації або швидкого замінення в польових умовах.

Електромагнітна сумісність – пінопласт є діелектричним матеріалом і не блокує електромагнітні хвилі, що дозволяє використовувати його у конструкціях дронів, де важлива стабільність передачі сигналів. Відсутність електропровідності робить пінопласт ідеальним матеріалом для корпусів дронів із вимогою високої якості радіозв'язку та безперешкодної роботи GPS, оскільки він не створює перешкод для навігаційних чи комунікаційних систем [27].

Алюміній – міцний, стійкий і термостійкий матеріал.

Висока міцність і жорсткість – алюмінієві елементи конструкції здатні витримувати значні навантаження, що робить їх придатними для створення міцних рам і кріплень, особливо у важких дронах або тих, які виконують складні задачі.

Стійкість до корозії – алюміній не піддається корозії, що забезпечує надійність конструкції навіть при роботі в агресивних середовищах, таких як морський клімат чи умови підвищеної вологості.

Термостійкість і стійкість до зовнішніх впливів – алюміній добре переносить високі температури, що дозволяє використовувати його у конструкціях, де важлива витримка теплових навантажень, особливо під час роботи на великих швидкостях або за екстремально високих температур.

Простота обробки та можливість адаптації – алюміній легко піддається різним видам обробки, що дозволяє швидко виготовляти та ремонтувати деталі

без необхідності у складному обладнанні. Ця гнучкість забезпечує можливість оперативних конструкційних змін і доопрацювань під час виробництва.

Електромагнітна сумісність – алюміній є високопровідним матеріалом і може створювати екрануючий ефект, блокуючи або спотворюючи електромагнітні хвилі. Це може впливати на роботу антен, сенсорів та інших електронних компонентів, що використовуються в БПЛА. Тому при проектуванні корпусів з алюмінію важливо враховувати розташування та ізоляцію антен, щоб забезпечити належний рівень передачі та прийому сигналу [28].

Деревина – доступна альтернатива для одноразових або недорогих БПЛА.

Доступність і легка обробка – деревина є доступним матеріалом у багатьох регіонах, що дозволяє створювати бюджетні дрони з мінімальними витратами. Простота обробки деревини навіть у польових умовах дозволяє швидко виготовляти і ремонтувати корпуси.

Демпфувальні властивості та міцність – деревина здатна поглинати вібрації та удари, що забезпечує захист для електронних компонентів дрона під час зльоту, посадки або зіткнень. Це робить її надійним вибором для легких дронів, які працюють у складних умовах.

Низька теплопровідність та малопомітність – дерев'яні елементи мають низьку теплопровідність, що дозволяє знизити теплову сигнатуру БПЛА. Це ускладнює виявлення дрона тепловізорами, що є важливим у військових операціях, де малопомітність відіграє важливу роль.

Екологічність та можливість утилізації – деревина є природним матеріалом, який легко утилізується, тому виготовлення дронів з деревини є менш шкідливим для довкілля порівняно із синтетичними матеріалами. Це важливо для цивільного сектору та проєктів з високими екологічними стандартами.

Електромагнітна сумісність – деревина є діелектриком і не створює перешкод для електромагнітних хвиль, що забезпечує належну електромагнітну сумісність із бортовими системами. Оскільки деревина не екранує радіосигнали,

її можна безпечно використовувати для дронів, у яких розташування антен та навігаційних пристроїв є критично важливим. Це робить деревину придатним матеріалом для дронів, які потребують стабільного зв'язку та навігації [29].

Вибір матеріалів для виготовлення корпусів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є ключовим етапом, який визначає ефективність, надійність та сферу застосування апаратів. Кожен з розглянутих матеріалів – склопластик, карбон, пінопласт, алюміній та деревина має свої переваги й недоліки, що впливають на їхню придатність до використання в БПЛА. Склопластик забезпечує легкість, міцність і корозійну стійкість, не створюючи перешкод для радіохвиль, що сприяє стабільній роботі навігаційних систем. Карбон володіє високою міцністю і жорсткістю, проте його електропровідність може обмежувати розміщення антен, що вимагає додаткової ізоляції. Пінопласт є надзвичайно легким і простим у обробці, а також не впливає на якість радіозв'язку, що робить його придатним для легких дронів. Алюміній відзначається стійкістю до механічних навантажень, однак його електропровідність може заважати роботі антен, що потребує врахування при проектуванні. Деревина є екологічним та доступним матеріалом, не блокує радіосигнали, що сприяє стабільності зв'язку та навігації. Отже, вибір матеріалу має ґрунтуватися на збалансованому поєднанні ваги, міцності, стійкості до умов середовища та електромагнітної сумісності, виходячи з конкретних вимог до БПЛА.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕРЕВИНИ ТА ДЕРЕВИНО-КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ, ЩО ВПЛИВАТИМУТЬ НА МОЖЛИВІСТЬ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОРПУСІВ БПЛА

У цьому розділі розглянемо матеріали, які будуть використовуватись для дослідження та їх характеристики.

Для дронів і компонентів, важливо вибрати матеріали, які забезпечують легкість і міцність, що є критичними властивостями для безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Карбонові композити і карбонові волокна (рис. 2.1) є популярними матеріалами у виробництві дронів.

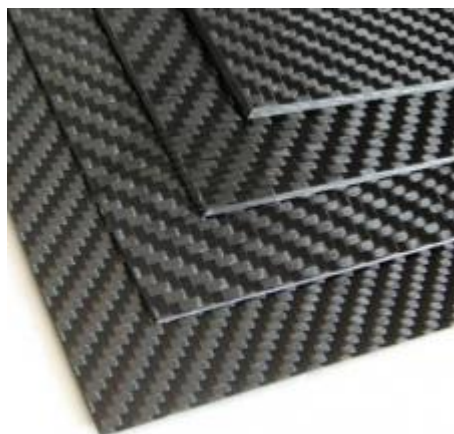


Рис. 2.1. Карбон [30]

Легкість – карбонові композити мають надзвичайно низьку масу при високій міцності. Це дозволяє зменшити вагу БПЛА, що впливає на польотні характеристики, ефективність пального, тривалість польоту та маневреність.

Міцність – карбонові волокна мають високу міцність при малій вазі, що забезпечує стійкість БПЛА до зовнішніх впливів, таких як вітер, зіткнення або падіння.

Жорсткість – карбонові композити мають високу модульну жорсткість, що сприяє підвищенню стійкості та контролю над польотом.

Висока теплопровідність – карбонові матеріали мають високу теплопровідність, що сприяє відведенню тепла від електроніки та двигунів, що підвищує ефективність системи та попереджує перегрівання.

Резистентність до корозії – карбонові матеріали стійкі до корозії, що особливо важливо в умовах польоту поблизу води або в агресивних довкіллях.

Електроізоляція – карбонові композити не мають властивостей електроізоляції, що створює електричні перешкоди та перешкоди для радіосигналів, що важливо для системи FPV [31].

Фанера (рис. 2.2) – композитний матеріал у вигляді шаруватої клеєної деревини, що складається із склеєних між собою трьох і більше листів луценого шпону із взаємно перпендикулярним розташуванням волокон деревини в суміжних шарах [32].



Рис. 2.2. Фанера [33]

Береза (рис. 2.3) – деревина, яка широко виростає в нашій країні, тому дошка з неї достатньо поширена і використовується для виконання найрізноманітніших завдань.

Твердість – за цим показником масивна дошка з берези поступається тільки визнаним лідерам – дубу і буку. Матеріал має високу стійкість до деформаційних впливів і поверхня набагато менше пошкоджується в порівнянні з популярною сосною та іншими м'якими породами.

Гнучкість – поки деревина ще не висушена, її можна вигнути і надати певну форму, після висихання конфігурація збережеться.



Рис. 2.3. Дошка берези [35]

Матеріал достатньо низький у ціні в порівнянні з іншими матеріалами [34].

Павловнія (рис. 2.4) – деревина світла, з медовим або світло-сірим відтінком. Має характерний шовковистий блиск, що виділяє її з подібних видів промислової деревини.



Рис. 2.4. Деревина павловнії [41]

Деревина Павловнії – одна з найм'якших у світі. Вага 1 м³ складає всього 310 – 350 кг[37]. Саме за легкість та унікальну міцність деревину павловнії часто порівнюють з алюмінієм. Серед фахівців виник навіть такий летючий вислів – «дерев'яний алюміній». Не має схильності до розтріскування та зміни форми. Одночасно є стійкою до утворення грибків і практично не гние. Відповідно, має чудові водовідштовхуючі властивості.



Рис. 2.5. Дошка граба [40]

Граб (рис. 2.5) це промисловий матеріал. Завдяки своїй міцності і стійкості до зношування, деревина користується попитом у виробництві. Матеріал використовується в суднобудуванні і автомобільної промисловості [38]. Ще цікава властивість деревини – граб легко піддається будь-яким видам механічної обробки в свіжому стані. Але при висиханні процес стає важким, тому що різко підвищується в'язкість матеріалу. З іншого боку, з'являється стійкість до розколювання – можна використовувати будь-які елементи кріплення, пошкодити основу неможливо [39].

РОЗДІЛ 3 ПРИЙНЯТТЯ ПРОЕКТНОГО РІШЕННЯ У ВИБОРІ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ БПЛА

3.1. Прийняття проектних рішень

Метод розставлення пріоритетів – це спосіб порівняти об’єкти за якістю і кількістю за допомогою показників або експертних оцінок. Це дозволяє визначити пріоритети об’єктів за окремими та загальними властивостями за допомогою матриці та математичної обробки.

Метод експертних оцінок – це спосіб обрати найкращі варіанти продукції, технології, обладнання, матеріалів та іншого за думкою експертів.

Для 5 матеріалів, описаних у попередньому розділі, вибрано 5 характеристик для порівняння та визначення пріоритету. Їх показано у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Основні характеристики обраних матеріалів

Назва матеріалу	Міцність на згин м/па	Міцність на стискання Мпа.	Щільність кг/м3	Ударна в’язкість Дж/см2	Ціна, грн/м2
Карбон	94,1	1000	1550	19	25000
Фанера	65	100	800	34	3600
Береза	110	45	520	9,3	3200
Павловнія	59,71	40	346	1,59	6700
Граб	128	60	640	9,9	5000

Для оцінки та порівняння 5 матеріалів для виготовлення дронів сформовано квадратні матриці 5x5 бінарних відношень. У них “m” – це характеристики, а “n” – різновиди матеріалів. У них знаки “>”, “=”, “<” показують відношення між характеристиками та різновидами [41].

Створено 5 матриць порівнюють показники за пріоритетом (важливістю) характеристик. Для цього створюють ще одну квадратну матрицю $m \times n$.

Щоб обчислити кількість для кожного показника, спочатку встановлено, який об’єкт має найвище значення, а потім знайдено різницю між цим значенням та найнижчим значенням за допомогою формули (3.1)[41]:

Чим вище значення міцності матеріалів на згин, тим краще. Адже це показує що матеріал може витримувати великі навантаження.

Для розрахунку кількісних показників, з урахуванням існуючої інформації, можна застосовувати числові показники, отримані від фахівців для кожного параметру. Значення K_j визначається за наведеною формулою (3.1), і це допомагає нам встановити розбіжність між найкращим і найгіршим значенням.

За допомогою цього методу ми визначаємо значення коефіцієнтів K_j та ω_j , використовуючи інформацію з відповідних табл. (3.3–3.6) та формули (3.1) і (3.2)

Таблиця 3.3

Матриця порівняння матеріалів за міцністю на стискання

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W
		1000	100	45	40	60		
X1	1000	=	>	>	>	>	25,00	1,0
X2	100	<	=	>	>	>		
		X1	X2	X3	X4	X5	K	W
		1000	100	45	40	60		
X3	45	<	<	=	>	<	25,00	1,0
X4	40	<	<	<	=	<		
X5	60	<	<	>	>	=		

Вище значення міцності на стискання означає, що матеріал може витримувати більший тиск перед тим, як почнеться його деформація або руйнування. Це важливо для виготовлення дронів або інших літальних апаратів, оскільки вони можуть бути піддані різним навантаженням під час польоту чи при посадці.

Таблиця 3.4

Матриця порівняння матеріалів за щільністю

		X1	X2	X3	X4	X5	К	W
		1550	600	520	346	640		
X1	1550	=	>	>	>	>	4,48	0,74
X2	600	<	=	>	>	<		
X3	520	<	<	=	>	<		
X4	346	<	<	<	=	<		
X5	640	<	>	>	>	=		

Для матеріалів, які використовуються у виготовленні дронів, важлива є висока міцність. Вище значення міцності вказує на те, що матеріал може витримувати більше механічного навантаження, що є важливим для дронів, які можуть бути піддані різним умовам, таким як вітер, турбуленція чи несправні посадки.

Таблиця 3.5

Матриця порівняння матеріалів за ударною в'язкістю

		X1	X2	X3	X4	X5	К	W
		19	34	9,3	1,59	9,9		
X1	19	=	<	>	>	>	21,38	1,01
X2	34	>	=	>	>	>		
X3	9,3	<	<	=	>	<		
X4	1,59	<	<	<	=	<		
X5	9,9	<	<	>	>	=		

Вище значення ударної в'язкості є бажаним у випадку виготовлення дронів. Це означає, що матеріал може добре абсорбувати енергію удару та має високу стійкість до ударів, що може бути важливим для захисту електроніки, механізмів і структур дрона в разі непередбачених обставин або аварій.

Таблиця 3.6

Матриця порівняння матеріалів за ціною

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W
		25000	3600	3200	6700	5000		
X1	25000	=	>	>	>	>	7,81	0,9
X2	3600	<	=	>	<	<		
X3	3200	<	<	=	<	<		
X4	6700	<	>	>	=	>		
X5	5000	<	>	>	<	=		

Зазвичай важливо зберігати баланс між вартістю та якістю. Деякі застосовувані матеріали можуть бути доступними за помірну ціну та володіти достатньою міцністю та легкістю. Однак в багатьох випадках високоякісні аерокосмічні або композитні матеріали можуть бути дорожчими, але вони можуть надавати велику міцність та низьку вагу.

Для встановлення пріоритету кожного матеріалу за кожним параметром P_{ij} і пріоритет параметру P_j , вводять поняття сили критерію L -го порядку $P(L)$, яке обчислюється по рядкам за вказаними формулами (3.5–3.11) [41]:

Перша ітерація:

$$P_i(1) = \sum_{i=1}^n a_{ij}, \quad (3.5)$$

$$P_j(1) = \sum_{j=1}^n a_j, \quad (3.6)$$

$$P_{ij}(1) = \frac{P_{ij}(L)}{\sum_{j=1}^n P_{ij}(L)}, \quad (3.7)$$

Друга ітерація:

$$P_j(2) = \sum_{j=1}^n a_j, \quad (3.8)$$

$$P_{ij}(2) = \frac{P_{ij}(L)}{\sum_{j=1}^n P_{ij}(L)}, \quad (3.9)$$

Третя ітерація:

$$P_j(3) = \sum_{j=1}^n a_j, \quad (3.10)$$

$$P_{ij}(3) = \frac{P_{ij}(L)}{\sum_{j=1}^n P_{ij}(L)}, \quad (3.11)$$

Результати записуємо у табл. 2.7.

За таким принципом розраховуємо та заповнюємо табл. 3.8–3.11.

Далі переходимо до розрахунку результатів експертної оцінки пріоритетів показників та заповнення табл. 3.12.

Таблиця 3.7

Матриця суміжності для порівняння матеріалів за міцністю на згин

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W	P _{i1}	P _{i1} *	P _{i2}	P _{i2} *	P _{i3}	P _{i3} *	
		94,1	65	110	59,71	128									
X1	94,1	1,00	1,50	0,50	1,50	0,50	2,14	0,5	5,00	0,20	22,00	0,19	100,00	0,19	
X2	65	0,50	1,00	0,50	1,50	0,50			4,00	0,16	17,50	0,15	80,25	0,15	
X3	110	1,50	1,50	1,00	1,50	0,50			6,00	0,24	27,50	0,24	124,75	0,24	
X4	59,71	0,50	0,50	0,50	1,00	0,50			3,00	0,12	14,00	0,12	64,50	0,12	
X5	128	1,50	1,50	1,50	1,50	1,00			7,00	0,28	34,00	0,30	155,50	0,30	
									Σ	25,00	1,00	115,00	1,00	525,00	1,00

Таблиця 3.8

Матриця суміжності для порівняння матеріалів на стискання

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W	P _{i1}	P _{i1} *	P _{i2}	P _{i2} *	P _{i3}	P _{i3} *
		1000	100	45	40	60								
X1	1000	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	25,00	1,0	9,00	0,36	41,00	0,48	129,00	0,57
X2	100	0,00	1,00	2,00	2,00	2,00			7,00	0,28	25,00	0,29	63,00	0,28
X3	45	0,00	0,00	1,00	2,00	0,00			3,00	0,12	5,00	0,06	7,00	0,03
X4	40	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00			1,00	0,04	1,00	0,01	1,00	0,00
X5	60	0,00	0,00	2,00	2,00	1,00			5,00	0,2	13,00	0,15	25,00	0,11
Σ									25,00	1,00	85,00	1,00	225,00	1,00

Таблиця 3.9

Матриця суміжності для порівняння матеріалів за щільністю

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W	P _{i1}	P _{i1} *	P _{i2}	P _{i2} *	P _{i3}	P _{i3} *
		1550	600	520	346	640								
X1	1550	1,00	1,74	1,74	1,74	1,74	4,48	0,74	7,96	0,32	37,61	0,36	151,56	0,37
X2	600	0,26	1,00	1,74	1,74	0,26			5,00	0,20	18,43	0,18	70,24	0,17
X3	520	0,26	0,26	1,00	1,74	0,26			3,52	0,14	12,12	0,12	47,63	0,12
X4	346	0,26	0,26	0,26	1,00	0,26			2,04	0,08	8,01	0,08	32,73	0,08
X5	640	0,26	1,74	1,74	1,74	1,00			6,48	0,26	26,92	0,26	103,80	0,26
Σ									25,00	1,00	103,10	1,00	405,96	1,00

Таблиця 3.10

Матриця суміжності для порівняння матеріалів за ударною в'язкістю

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W	P _{i1}	P _{i1} *	P _{i2}	P _{i2} *	P _{i3}	P _{i3} *
		19	34	9,3	1,59	9,9								
X1	19	1,00	0,00	2,00	2,00	2,00	21,38	1,0	7,00	0,28	25,00	0,29	63,00	0,28
X2	34	2,00	1,00	2,00	2,00	2,00			9,00	0,36	41,00	0,48	129,00	0,57
X3	9,3	0,00	0,00	1,00	2,00	0,00			3,00	0,12	5,00	0,06	7,00	0,03
X4	1,59	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00			1,00	0,04	1,00	0,01	1,00	0,00
X5	9,9	0,00	0,00	2,00	2,00	1,00			5,00	0,20	13,00	0,15	25,00	0,11
								Σ	25,00	1,00	85,00	1,00	225,00	1,00

Таблиця 3.11

Матриця суміжності для порівняння матеріалів за ціною

		X1	X2	X3	X4	X5	K	W	P _{i1}	P _{i1} *	P _{i2}	P _{i2} *	P _{i3}	P _{i3} *
		25000	3600	3200	6700	5000								
X1	25000	1,00	1,90	1,90	1,90	1,90	7,81	0,9	8,60	0,34	39,76	0,43	140,16	0,47
X2	3600	0,10	1,00	1,90	0,10	0,10			3,20	0,13	7,90	0,09	23,14	0,08
X3	3200	0,10	0,10	1,00	0,10	0,10			1,40	0,06	3,76	0,04	12,64	0,04
X4	6700	0,10	1,90	1,90	1,00	1,90			6,80	0,27	25,90	0,28	81,06	0,27
X5	5000	0,10	1,90	1,90	0,10	1,00			5,00	0,20	15,28	0,17	44,00	0,15
Σ									25,00	1,00	92,60	1,00	301,00	1,00

Таблиця 3.12

Результати експертної оцінки пріоритетів показників

Кількість експертів	Теплопровідність, Вт / мК			Густина, кг / м ³			Температура використання, °С			Паропроникність, мг/(м·год·Па)			Ціна, грн/м ²		
	X_i	$X_{\text{сеп}}-X_i$	$(X_{\text{сеп}}-X_i)^2$	X_i	$X_{\text{сеп}}-X_i$	$(X_{\text{сеп}}-X_i)^2$	X_i	$X_{\text{сеп}}-X_i$	$(X_{\text{сеп}}-X_i)^2$	X_i	$X_{\text{сеп}}-X_i$	$(X_{\text{сеп}}-X_i)^2$	X_i	$X_{\text{сеп}}-X_i$	$(X_{\text{сеп}}-X_i)^2$
1	5	-0,86	0,73	1	0,71	0,51	1	1,29	1,65	5	-1,71	2,94	3	0,2857	0,0816
2	3	1,14	1,31	2	-0,29	0,08	2	0,29	0,08	2	1,29	1,65	3	0,2857	0,0816
3	3	1,14	1,31	4	-2,29	5,22	5	-2,71	7,37	2	1,29	1,65	4	-0,714	0,5102
4	5	-0,86	0,73	2	-0,29	0,08	2	0,29	0,08	2	1,29	1,65	3	0,2857	0,0816
5	5	-0,86	0,73	1	0,71	0,51	4	-1,71	2,94	2	1,29	1,65	3	0,2857	0,0816
6	5	-0,86	0,73	1	0,71	0,51	1	1,29	1,65	5	-1,71	2,94	3	0,2857	0,0816
7	3	1,14	1,31	1	0,71	0,51	1	1,29	1,65	5	-1,71	2,94	4	-0,714	0,5102
Середнє значення балу	4,14			1,71			2,29			3,29			3,29		
Середнє квадратичне відхилення			0,99			1,07			1,45			1,57			0,46
Коефіцієнт варіації / 100%			0,24			0,62			0,64			0,48			0,14
		$K_{\text{експ.1}}$	0,76		$K_{\text{експ.2}}$	0,38		$K_{\text{експ.3}}$	0,36		$K_{\text{експ.4}}$	0,52		$K_{\text{експ.5}}$	0,86
Загальний коефіцієнт погодження експертів									0,58						

Для кожного ряду відповідей (табл.3.12) ми обчислюємо середнє значення x_{ij} та середнє квадратичне відхилення S_{ij} за формулами (3.12–3.13)[41]:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij}}{m}, \quad (3.12)$$

$$S_{ij} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_{ij})^2}{m-1}}, \quad (3.13)$$

де: x_{ij} – оцінка j -го експерта по i -му питанню;

m – кількість експертів.

Розраховуємо коефіцієнт варіації V_{ij} за формулою (3.14)[41]:

$$V_{ij} = \frac{S_{ij}}{\bar{x}_{ij}} \cdot 100\%, \quad (3.14)$$

Загальний коефіцієнт погодження експертів розраховуємо за формулами (2.6-2.7)[9]:

$$K_E = \frac{\sum_{i=1}^n K_{Eij}}{\sum_{i=1}^n m_{ij}}, \quad (3.15)$$

$$K_{Eij} = 1 - \frac{S_{ij}}{\bar{x}_{ij}}, \quad (3.16)$$

де: n – кількість характеристик в анкеті;

m_{ij} – кількість оцінок по кожній характеристиці в кожному з вирівняних рядів.

Якщо $0,5 \leq K_E \leq 1$, то думка експертів погоджена.

Складено квадратну матрицю бінарних відношень (табл. 3.13).

Таблиця 3.13

Матриця бінарних відношень

		Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	K	W
		4,14	1,71	2,29	3,29	3,29		
Y1	4,14	=	>	>	>	>	2,42	0,51
Y2	1,71	<	=	<	<	<		
Y3	2,29	<	>	=	<	<		
Y4	3,29	<	>	>	=	=		
Y5	3,29	<	>	>	=	=		

Співвідношення між об'єктами виражені математичними символами ($>$), ($=$), ($<$).

Визначаємо різницю між найкращим і найгіршим об'єктом у кількісних одиницях, застосовуючи формулу (2.1):

Далі знаходимо коефіцієнт ω_j , за формулою (3.2):

Суміжні члени матриць розраховуємо за формулами (3.3–3.4).

Підставляємо значення α_{ij} замість математичних символів ($>$), ($=$), ($<$). Потім ми формуємо матрицю суміжності, щоб зробити порівняння показників в (табл. 3.14).

Таблиця 3.14

Матриця суміжності для порівняння показників, що характеризують матеріали

		Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	K	W	P _{i1}	P _{i1} *	P _{i2}	P _{i2} *	
		4,14	1,71	2,29	3,29	3,29							
Y1	4,14	1,00	1,51	1,51	1,51	1,51	2,42	0,51	7,04	0,28	34,16	0,30	
Y2	1,71	0,49	1,00	0,49	0,49	0,49			2,96	0,12	13,76	0,12	
Y3	2,29	0,49	1,51	1,00	0,49	0,49			3,98	0,16	17,30	0,15	
		Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	K	W	P _{i1}	P _{i1} *	P _{i2}	P _{i2} *	
		4,14	1,71	2,29	3,29	3,29							
Y4	3,29	0,49	1,51	1,51	1,00	1,00			5,51	0,22	24,95	0,22	
Y5	3,29	0,49	1,51	1,51	1,00	1,00			5,51	0,22	24,95	0,22	
									Σ	25,00	1,00	115,12	1,00

Розрахунок аналогічних до попередніх таблиць за формулами (3.5–3.6).

Створюємо загальну матрицю на основі результатів, щоб визначити комплексний пріоритет матеріалу (табл. 3.15).

Таблиця 3.15

Підсумкова матриця

Матеріал	Пріоритет матеріалу по одиничних показниках					Пріоритет показника		Комплексний пріоритет матеріалу
	1	2	3	4	5	номер	значення	
Карбон	0,19	0,57	0,37	0,28	0,47	1	0,30	0,34
Фанера	0,15	0,28	0,17	0,57	0,08	2	0,12	0,24
Береза	0,24	0,03	0,12	0,03	0,04	4	0,15	0,11
Павловнія	0,12	0,00	0,08	0,00	0,27	5	0,22	0,11
Граб	0,30	0,11	0,26	0,11	0,15	3	0,22	0,20

Загальна матриця показує, що найвищий пріоритет належить карбону, який був обраний як еталонний матеріал, тому очевидно, що він лідирує за розрахунком, а фанера займає друге місце, як найкраща з можливих альтернатив карбону.

3.2. Рішення багатокритеріальної задач методом аналізу ієрархій

Американський науковець Томас Сааті створив метод аналізу ієрархій (МАІ) у 70-80 роках ХХ століття. Цей метод застосовується для порівняння та впорядкування об'єктів, які характеризуються різними критеріями і показниками, які можуть мати як кількісний, так і якісний характер. МАІ є математичною технікою, яка сприяє вирішенню складних задач прийняття рішень з використанням системного підходу. Він не нав'язує “правильне” рішення, а дозволяє вибрати такий варіант (альтернативу), який найкраще відображає розуміння проблеми та вимоги до її розв'язання через спілкування та дискусію.

Для вирішення завдання необхідні наступні дані:

Мета: вибір кращого матеріалу.

Кількість альтернатив – 5.

Кількість критеріїв – 5.

Позначено альтернативи та критерії скороченими назвами:

№	Критерії	№	Альтернативи
Кр1	Міцність на згин	A1	Карбон
Кр2	Міцність на стискання	A2	Фанера
Кр3	Щільність	A3	Береза
Кр4	Ударна в'язкість	A4	Павловнія
Кр5	Ціна	A5	Граб

Для вирішення завдання створюється спеціальна матриця, в якій проводяться парні порівняння, і ця матриця заповнюється відповідно до шкали Сааті, яка подана в табл. 2.15.

Для того, щоб обрати найкращий матеріал, була створена та заповнена матриця парних порівнянь (МПП) (табл. 3.1) критеріїв, які відповідають меті. Цей процес ґрунтується на індивідуальному аналізі того, як властивості впливають на досягнення певної мети.

Розраховуємо значення середнього геометричного значення елементів матриці за формулою (3.17)[41]:

$$G_i(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{is}) = (a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot \dots \cdot a_{is})^{\frac{1}{s}}, \quad (3.17)$$

де: i – номер рядка матриці;

s – кількість елементів в s -му рядку матриці;

$a_{i1} = w1/w1; a_{i2} = w2/w2; \dots a_{is} = w1/w_s$.

Розраховуємо значення ЛПр на прикладі першого рядка за формулою (3.18) [9]:

$$ЛПр_1 = \frac{[(w1/w1) \cdot (w2/w2) \cdot \dots \cdot (wn/wn)]^{\frac{1}{s}}}{(G_1 + G_2 + \dots + G_n)}, \quad (3.18)$$

Аналогічно ЛПр розраховується й для інших рядків.

Далі проводиться перевірка, наскільки чіткі та консистентні експертні оцінки, а саме числа в матрицях парних порівнянь. Для цього контролю застосовуються дві важливі характеристики – індекс узгодженості (CI) і відношення узгодженості (CR), які обчислюються за формулами (3.19–3.20)[41]:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad (3.19)$$

$$CR = \frac{CI}{P_n}, \quad (3.20)$$

де: n – розмір матриці;

P_n – індекс узгодженості (табл. 3.16) для позитивної зворотної симетричної матриці випадкових оцінок $n \times n$;

Далі обчислюють λ_{max} – максимальне власне число матриці парних порівнянь або L_{am} .

Результати розрахунків занесено в (табл. 3.16).

За допомогою цього методу розраховано та заповнено (табл. 3.17 – 3.21).

Таблиця 3.16

Матриця МПП критеріїв відносно мети

	Назва	Кр1	Кр2	Кр3	Кр4	Кр5	G	ЛПр1
Кр1	Міцність на згин	1	1,33	2,00	0,89	1,14	1,221	0,235
Кр2	Міцність на стискання	0,75	1	1,50	0,67	0,86	0,915	0,176
Кр3	Щільність	0,50	0,67	1	0,44	0,57	0,610	0,118
Кр4	Ударна в'язкість	1,13	1,50	2,25	1	1,29	1,373	0,265
Кр5	Ціна	0,88	1,17	1,75	0,78	1	1,068	0,206
Сума							5,187	1,00

Показники: $N=5$; $L_{am}=5,757$; $CI=0,189$; $CR=0,169$

Найбільше значення ЛПр=0,265

Таблиця 3.17

Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію «міцність на згин»

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	ЛПр2
A1	Карбон	1	1,20	0,86	1,50	0,67	1,006	0,194
A2	Фанера	0,83	1	0,71	1,25	0,56	0,838	0,161
A3	Береза	1,17	1,40	1	1,75	0,78	1,173	0,226
A4	Павловнія	0,67	0,80	0,57	1	0,44	0,670	0,129
A5	Граб	1,50	1,80	1,29	2,25	1	1,508	0,290
Сума							5,196	1,00

Показники: N=5; $\lambda_{max}=5,814$; CI=0,203; CR=0,182

Найбільше значення ЛПр=0,290

Таблиця 3.18

Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію «міцність на стискання»

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	ЛПр3
A1	Карбон	1	1,29	1,80	2,25	1,50	1,508	0,290
A2	Фанера	0,78	1	1,40	1,75	1,17	1,173	0,226
A3	Береза	0,56	0,71	1	1,25	0,83	0,838	0,161
A4	Павловнія	0,44	0,57	0,80	1	0,67	0,670	0,129
A5	Граб	0,67	0,86	1,20	1,50	1	1,006	0,194
Сума							5,196	1,00

Показники: N=5; $\lambda_{max}=5,814$ CI=0,203; CR=0,182

Найбільше значення ЛПр=0,290

Таблиця 3.19

Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію «Щільність»

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	ЛПр4
A1	Карбон	1	1,29	1,50	2,25	1,13	1,373	0,265
A2	Фанера	0,78	1	1,17	1,75	0,88	1,068	0,206
A3	Береза	0,67	0,86	1	1,50	0,75	0,915	0,176
A4	Павловнія	0,44	0,57	0,67	1	0,50	0,610	0,118
A5	Граб	0,89	1,14	1,33	2,00	1	1,221	0,235
Сума							5,187	1,00

Показники: $N=5$; $\lambda_{\text{am}}=5,757$; $CI=0,189$; $CR=0,169$

Найбільше значення ЛПр=0,265

Таблиця 3.20

Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію «ударна в'язкість»

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	ЛПр5
A1	Карбон	1	0,78	1,40	1,75	1,17	1,173	0,226
A2	Фанера	1,29	1	1,80	2,25	1,50	1,508	0,290
A3	Береза	0,71	0,56	1	1,25	0,83	0,838	0,161
A4	Павловнія	0,57	0,44	0,80	1	0,67	0,670	0,129
A5	Граб	0,86	0,67	1,20	1,50	1	1,006	0,194
Сума							5,196	1,00

Показники: $N=5$; $\lambda_{\text{am}}=5,814$; $CI=0,203$; $CR=0,182$

Найбільше значення ЛПр=0,290

Таблиця 3.21

Матриця МПП альтернатив по відношенню до критерію «ціна»

	Назва	A1	A2	A3	A4	A5	G	ЛПр6
A1	Карбон	1	0,50	0,44	0,67	0,57	0,610	0,118
A2	Фанера	2,00	1	0,89	1,33	1,14	1,221	0,235
A3	Береза	2,25	1,13	1	1,50	1,29	1,373	0,265
A4	Павловнія	1,50	0,75	0,67	1	0,86	0,915	0,176
A5	Граб	1,75	0,88	0,78	1,17	1	1,068	0,206
Сума							5,187	1,00

Показники: $N=5$; $\lambda_{\text{ам}}=5,757$; $CI=0,189$; $CR=0,169$

Найбільше значення ЛПр=0,265

Створено матрицю пріоритетів критеріїв, які відповідають меті, та альтернатив, які відповідають кожному з критеріїв (табл. 3.7).

Таблиця 3.22

Матриця пріоритетів критеріїв відносно мети та альтернатив відносно кожного з критеріїв

	Назва	ПрКр	A1 Карбон	A2 Фанера	A3 Береза	A4 Павловнія	A5 Граб
Кр1	Міцність на згин	0,235	0,194	0,161	0,226	0,129	0,290
Кр2	Міцність на стискання	0,176	0,290	0,226	0,161	0,129	0,194
Кр3	Щільність	0,118	0,265	0,206	0,176	0,118	0,235
Кр4	Ударна в'язкість	0,265	0,226	0,290	0,161	0,129	0,194
Кр5	Ціна	0,206	0,118	0,235	0,265	0,176	0,206

Наступним кроком є визначення глобального пріоритету ГлПр.

Отримані дані заносимо у табл. 3.23

Таблиця 3.23

Глобальні пріоритети альтернатив

	Назва	ГлПр
1	Карбон	0,212
2	Фанера	0,227
3	Береза	0,200
4	Павловнія	0,137
5	Граб	0,224

Із табл. 3.23 видно, що Альтернатива А2 (Фанера) має найбільше значення глобального пріоритету – 0,227 і є найкращою для досягнення поставленої мети.

За результатами розрахунку визначено що фанера має найбільше значення глобального пріоритету 0,227, звідси можна сказати що фанеру варто використовувати як матеріал який потенційно може замінити карбонові комплектуючі, здешевити та спростити процес їх виготовлення, так як цей матеріал є більш доступним ніж карбон та простішим в обробці.

РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ФІЗИЧНИХ І ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ БПЛА

Загальна матриця показує, що найвищий пріоритет належить карбону, який був обраний як еталонний матеріал, тому очевидно, що він лідирує за розрахунком, а фанера займає друге місце, як найкраща з можливих альтернатив карбону.

За результатами розрахунку альтернативи, визначено що фанера має найбільше значення глобального пріоритету 0,227, звідси можна сказати що фанеру варто використовувати як матеріал який потенційно може замінити карбонові комплектуючі, здешевити та спростити процес їх виготовлення, так як цей матеріал є більш доступним ніж карбон та простішим в обробці.

Для подальших досліджень вибрано такий тип БПЛА як мультироторний квадрокоптер FPV типу. Карбон як матеріал і так використовується для виготовлення комплектуючих для даного типу дронів і має свої недоліки.

В першу чергу висока вартість – карбон є дорогим матеріалом, що значно підвищує загальні витрати на виробництво БПЛА, особливо при масштабному виробництві. Це робить його менш економічним для одноразових або бюджетних дронів.

Проблеми з електромагнітною сумісністю – карбон є провідним матеріалом, що може створювати перешкоди для електронних пристроїв, таких як антени, які потребують вільного проходження сигналу. Це вимагає додаткової ізоляції антен або віддалення їх від карбонових елементів.

Інший матеріал це фанера. Фанера це матеріал який використовується для БПЛА літакового типу вона є популярним матеріалом для виготовлення корпусів і конструктивних елементів безпілотних літальних апаратів літакового типу завдяки своїй доступності, легкості й відносно простій обробці. Її використання дозволяє знизити загальну вагу конструкції, що є критичним для аеродинамічної ефективності БПЛА та тривалості його польоту. Фанера має низьку вартість у порівнянні з такими дорогими матеріалами, як карбон чи алюміній, що робить її

економічно вигідним матеріалом для виробництва бюджетних моделей або одноразових дронів, де скорочення витрат на матеріали є важливим.

Фанера легко піддається механічній обробці – її можна швидко розрізати, свердлити та формувати без спеціального обладнання, що полегшує процес виготовлення корпусу. Завдяки своїй шаруватій структурі, фанера володіє достатньою міцністю для створення базових елементів каркасу, а також поглинає вібрації під час польоту, що допомагає захищати внутрішні електронні компоненти дрона. Це зменшує негативний вплив вібрацій на сенсори та акумулятори, які можуть бути особливо вразливими до ударних навантажень.

Однак фанера є малоприсадибним матеріалом для FPV дронів через низку причин, які обмежують її ефективність в умовах, необхідних для таких апаратів.

FPV дрони призначені для польоту з високою маневреністю, де стабільність, аеродинаміка та стійкість конструкції є ключовими. Фанера, хоч і має достатню міцність для базових конструкцій, не здатна забезпечити рівень жорсткості, який потрібен FPV дронам. Ці апарати піддаються значним навантаженням, особливо при виконанні різких маневрів, де слабка жорсткість фанери може призводити до деформацій, що, в свою чергу, вплине на керованість і стабільність польоту.

Крім того, фанера є досить важким матеріалом. Це створює додаткове навантаження на двигуни та батареї, знижуючи загальну тривалість польоту FPV дрона, що особливо важливо для довготривалих польотів.

Також фанера вразлива до впливу вологи та перепадів температури, що є критичним для FPV дронів, які часто використовуються в різних кліматичних умовах, інколи у вологому або навіть дощовому середовищі. Вологопоглинання може призвести до розшарування фанери або її деформації, що послаблює цілісність корпусу і підвищує ймовірність поломок під час польоту. А додаткове покриття захисними матеріалами збільшує вагу корпусу. Зміни температур також можуть негативно вплинути на фанеру, що призводить до зниження її жорсткості та стабільності.

Альтернативним матеріалом було вибрано не шліфовану ХДФ плиту яка не поступається міцності фанері, легша за неї та дешевша за карбон, також вона не є провідником, що позитивно впливає на передачу та прийом радіохвиль [42]. Вирішено використовувати плиту 3 мм.

Проводимо дослідження даного матеріалу на фізико механічні властивості щоб зрозуміти чи підходить він нам.

Дослідження фізико-механічних характеристик високощільних деревоволокнистих плит (ХДФ) проводяться в лабораторних умовах для визначення їхніх властивостей, таких як міцність на згин і щільність.

У процесі дослідження міцності ХДФ на згин використовувалась випробувальна машина Р-5 [43], яка дозволяє проводити дослідження механічних властивостей матеріалів у різних режимах навантаження. Для випробувань було підготовлено зразки ХДФ у відповідності до вимог завдання. Підготовлені зразки мали певну довжину, ширину та товщину, що дозволяло провести випробування у триточковій схемі згину.

Випробування проводилось у лабораторії за стабільних температурних та вологісних умов, що дозволяло отримати достовірні результати. На випробувальній машині встановлювали спеціальні опори для згину, а зразок розміщувався на цих опорах таким чином, щоб точка прикладання навантаження була посередині між опорами. У триточковому режимі машина рівномірно збільшувала навантаження на середню точку зразка, створюючи згинальний момент. Машина реєструвала зусилля, що прикладалося до зразка, і відповідну деформацію [44].

Під час випробування спостерігалось, як зразок поступово деформується в зоні дії сили. Найбільше напруження виникало у розтягнутій зоні, і в момент досягнення граничного навантаження зразок руйнувався. Дані з машини дозволили отримати точне значення максимального навантаження та деформації, які потім використовувались для розрахунку межі міцності ХДФ на згин за формулою (4.1):

$$\rho = \frac{3F \cdot l}{2b \cdot h^2} \quad (4.1)$$

Де F – Максимальне навантаження, Н;

l – відстань між опорами випробувального пристрою, мм;

b, h – ширина і товщина зразка, мм.

$$\rho = \frac{3 \cdot 71,15 \cdot 170}{2 \cdot 31 \cdot 3^2} = 65,0 \text{ МПа}$$

Також було проведено дослідження для карбону:

$$\rho = \frac{3 \cdot 1800 \cdot 150}{2 \cdot 9 \cdot 6^2} = 1250,0 \text{ МПа}$$

Дослідження показали, що карбон як еталонний матеріал найкращий, а ХДФ сильно поступається в міцності даному композиту.

Було підготовлено зразки ХДФ відповідно до вимог стандарту для випробувань. Проведено вимірювання маси кожного зразка за допомогою високоточних лабораторних вагів з похибкою до 0,01 г, що дозволяє отримати точні дані для розрахунків щільності [45].

Після зважування виконано вимірювання геометричних розмірів зразків для визначення їх об'єму. За допомогою штангенциркуля з точністю 0,1 мм виміряно довжину, ширину та товщину кожного зразка. Об'єм зразка розраховано за формулою (4.2):

$$V = l \cdot w \cdot h \quad (4.2)$$

де l – довжина зразка, мм, b – його ширина, мм, і h – товщина, мм.

$$V = 170 \cdot 31 \cdot 3 = 15810 \text{ мм}^3$$

Отримані значення об'єму разом із масою використано для обчислення щільності матеріалу за формулою:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{14230}{15810} = 0,900 \text{ мг / мм}^3 = 900 \text{ кг/м}^3$$

де m – маса зразка мг, а V – об'єм мм³.

Після завершення розрахунків визначено щільність кожного зразка ХДФ. Підсумкові результати дослідження щільності використано для подальшої оцінки якості матеріалу.

Після проведення точних вимірювань маси та об'єму зразків, було підтверджено, що щільність ХДФ перебуває в межах допустимих для нас показників. Це свідчить про високу якість матеріалу, його стійкість до

деформацій та довговічність. Щільність ХДФ особливо важлива для корпусів дронів, оскільки вона визначає вагу конструкції і впливає на стабільність під час польоту. Легкий, але щільний матеріал забезпечує міцність корпусу, не збільшуючи загальну вагу дрона.

Результати дослідження міцності ХДФ на згин показали, що його здатність витримувати згинальні навантаження не повністю відповідає нашим вимогам для використання в FPV дронах.

Після проведення попередніх досліджень фізико-механічних характеристик ХДФ, у ході яких були виявлені як переваги, так і обмеження матеріалу, було прийнято рішення створити раму каркасного типу для FPV дрона. Така конструкція дозволяє рівномірніше розподілити навантаження по всій площі корпусу, зменшити загальну вагу і підвищити жорсткість рами, забезпечивши при цьому базовий рівень захисту. Завдяки використанню ХДФ із каркасною структурою, вдалося врахувати обмеження матеріалу, а саме недостатню міцність на згин, що було виявлено на попередніх етапах випробувань.

У цій конструкції рама з ХДФ буде сформована таким чином, щоб забезпечити максимально рівномірний розподіл навантажень та підвищити опірність до згинальних і ударних впливів. Конструкція передбачає ребра жорсткості, що підвищують міцність без значного збільшення ваги. Ребра жорсткості дозволяють знизити навантаження на найбільш вразливі зони, водночас залишаючи основний об'єм матеріалу неушкодженим навіть при механічних впливах.

В умовах, коли навіть каркасна конструкція з ХДФ не гарантує повного захисту від ударів, особливо при суттєвих зіткненнях, було прийнято концептуальне рішення використовувати такий корпус для дронів типу "камікадзе". Це означає, що основна функція корпусу полягає не в довготривалому використанні, а в забезпеченні максимальної ефективності на короткий час – для одиничної місії, де після завершення польоту з високою ймовірністю корпус буде пошкоджено чи зруйновано.

Вага дрона з ХДФ-корпусом становить 152 грами, що хоч і трохи важче за карбоновий варіант (який важить близько 110 грамів), але значно легше за фанерний корпус, що за розрахунками важить приблизно 200 грамів. Ця золота середина по вазі дозволяє ХДФ вигідно поєднувати в собі легкість і достатню механічну стійкість, не перевантажуючи дрон і не погіршуючи його маневреність.

Також було проведено дослідження міцності на згин вже готової рами. Дослідження показало міцність рами 63,70 кілограми, що майже в 9 разів більше ніж властивості матеріалу.

Також було проведено дослідження вібраційних властивостей за допомогою гіроскопу [46]. Порівнювались дві рами карбонова та рама з ХДФ.

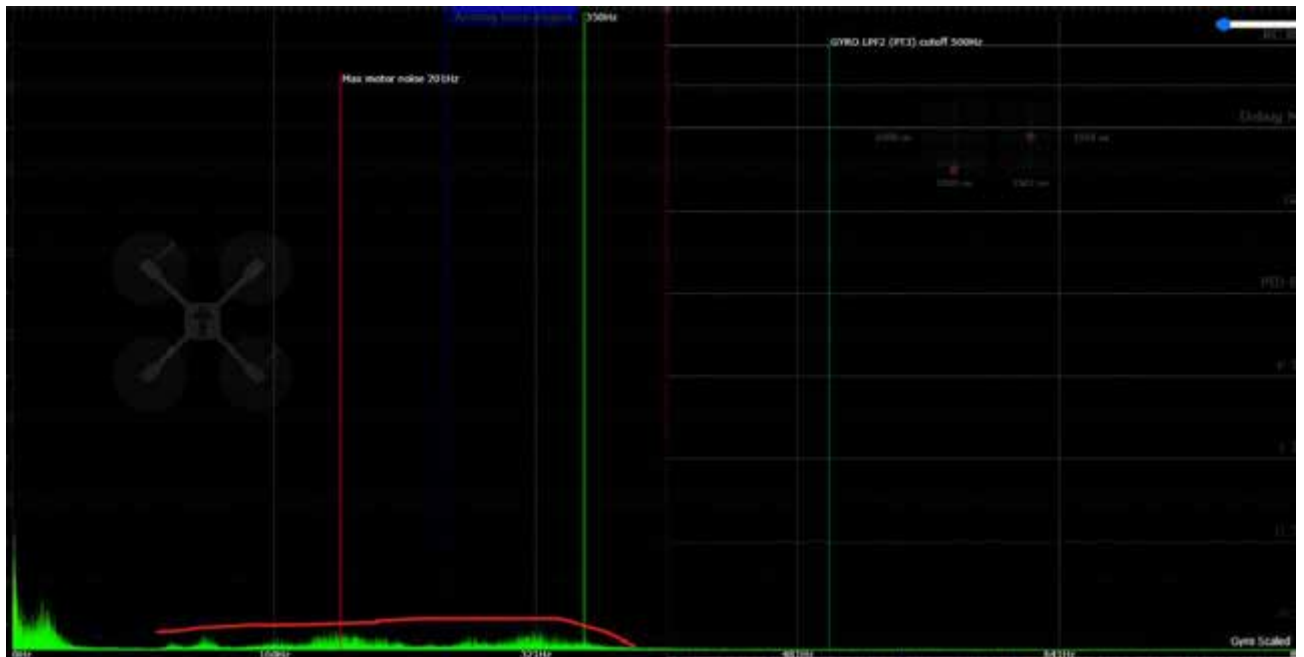


Рис. 4.1. Вібрації від моторів

На рис. 4.1 видно незначні вібрації від моторів, які приходять на гіроскоп. Далі ці дані потрапляють в політний контролер і фільтруються відповідно

Після фільтрації (рис. 4.2) ми бачимо, що вібрації моторів були відфільтровані RPM фільтрами політного контролера[47].

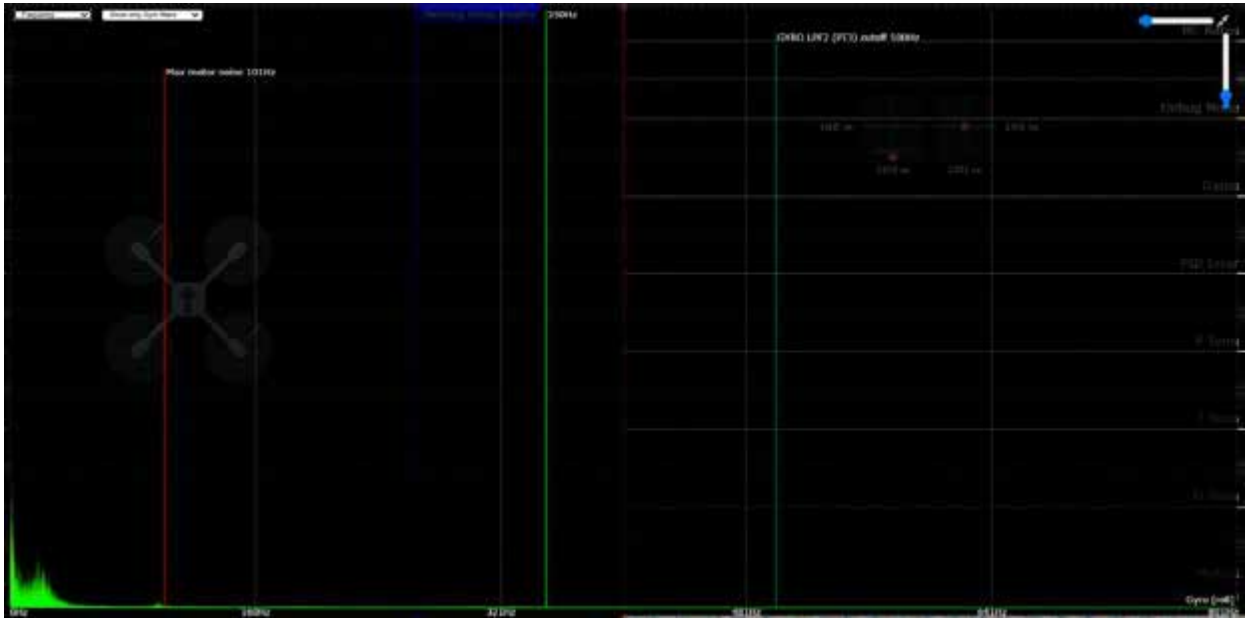


Рис. 4.2. Вібрації після фільтрації

Схожу ситуацію можна побачити на тепловій карті (рис. 4.3), де відображені вібрації рами, хоча збірка досить добре себе показала і якихось великих резонансів немає.

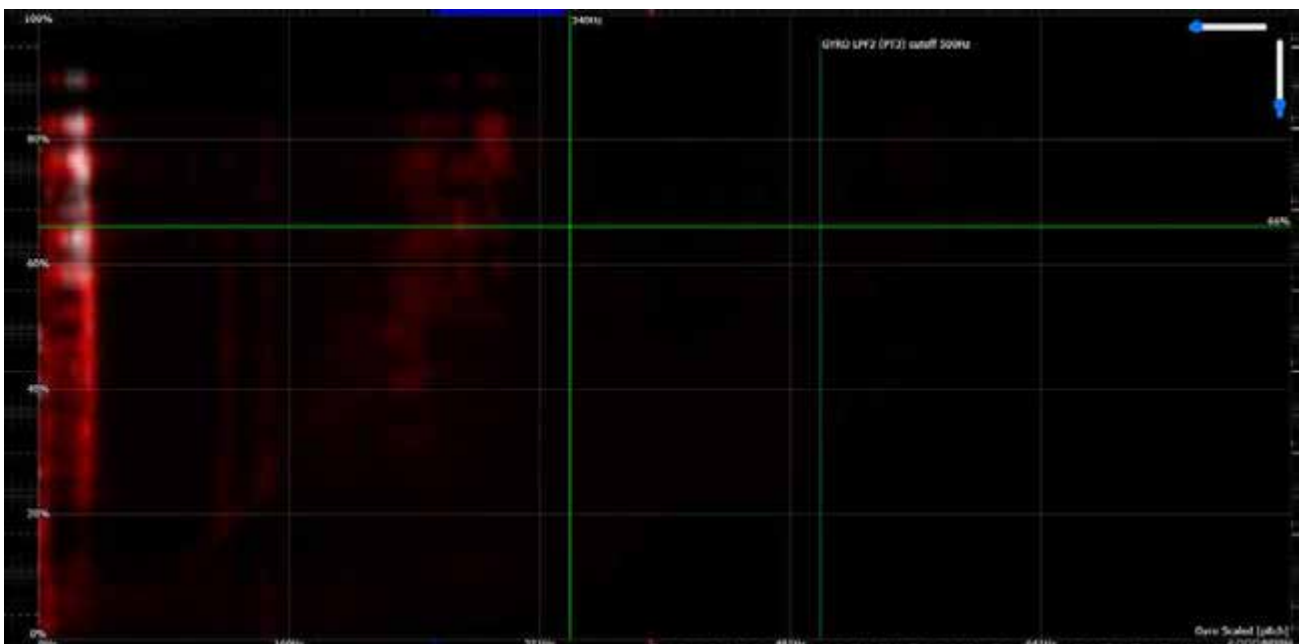


Рис. 4.3. Теплова карта вібрацій



Рис. 4.4. Шуми після фільтрації

Присутні незначні шуми від рами (рис. 1.20) в діапазоні від 200 Гц до 300 Гц і вони так само фільтруються політним контролером.

При дослідженні карбонової рама виявлено вібрації двигунів (рис. 4.5), які фіксує гіроскоп.

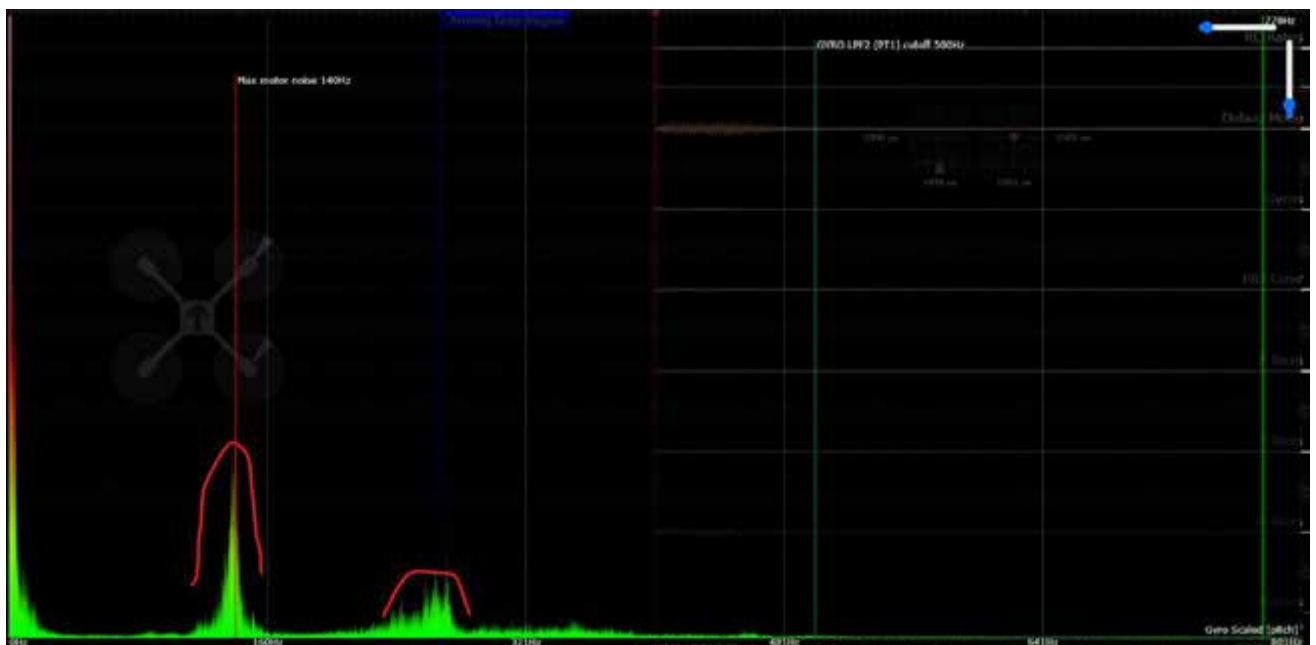


Рис. 4.5. Вібрації двигунів

І з цими вібраціями політний контролер справляється завдяки RPM фільтрам (рис. 4.6).

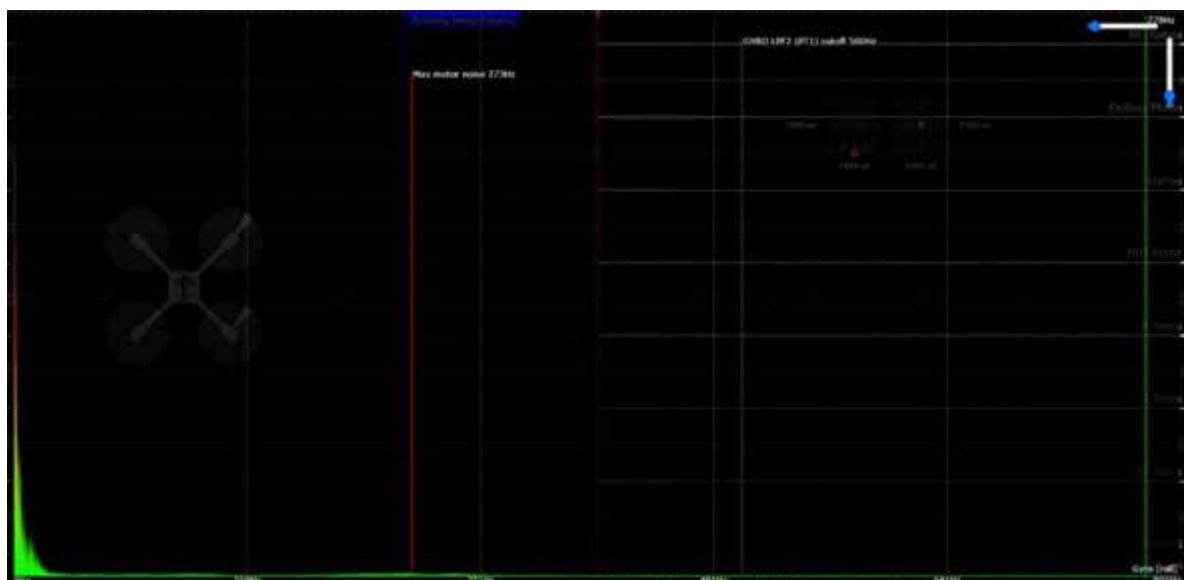


Рис. 4.6. Вібрації після фільтрації

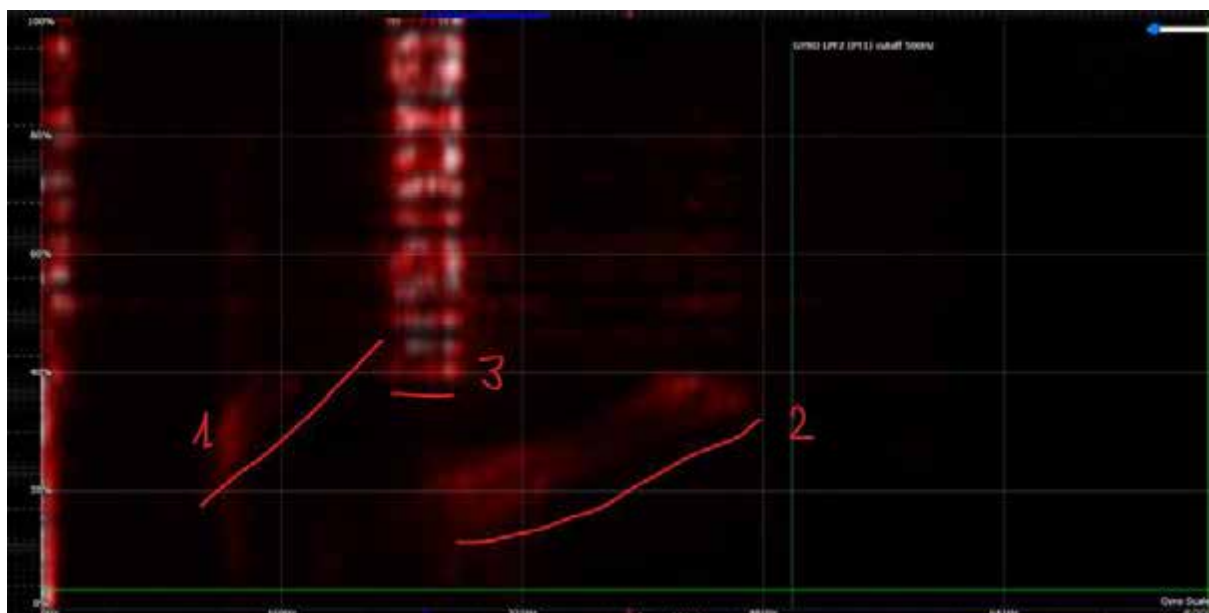


Рис. 4.7. Вібрації рами

Далі розглянемо вібрацію рами. Видно (рис. 4.7), що гіроскоп фіксує дві гармоніки від моторів (1 та 2) і ще один резонанс рами, який проявляє себе після 40% газу (3).

Також все фільтрується і на політ не впливає.

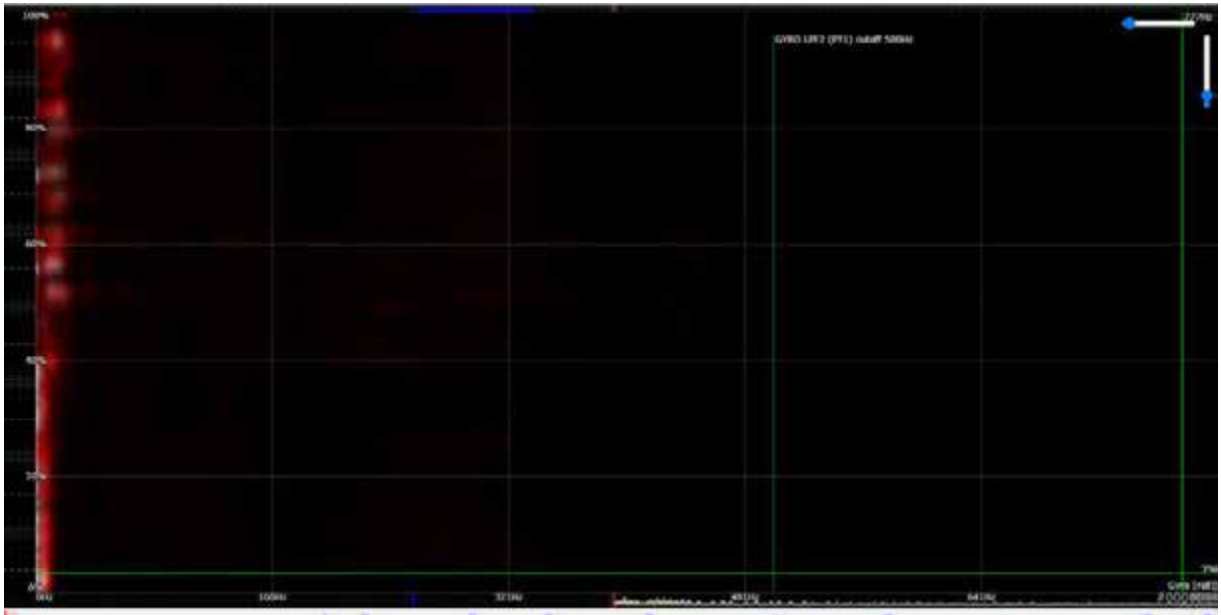


Рис. 4.8. Вібрації після фільтрації

Як показали ці два приклади, деревина теж може досить ефективно використовуватись у якості матеріалу для виготовлення комплектуючих для БПЛА

Проведене дослідження підтвердило ефективність підходів до використання деревини та інноваційних матеріалів у конструкціях безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Розробка методик оцінки та вибору матеріалів відкриває нові перспективи для створення економічно вигідних, екологічно чистих та технічно досконалих апаратів. У сучасних умовах, коли швидкість розробки та виробництва є критичними, застосування легкодоступних матеріалів, таких як деревина, показало свою доцільність та потенціал для широкого застосування.

ВИСНОВКИ

У ході дослідження було обґрунтовано доцільність використання деревини та інших альтернативних матеріалів для виготовлення компонентів безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Сучасні технології відкривають широкі можливості для підвищення ефективності дронів шляхом застосування легких, міцних і економічно вигідних матеріалів, що особливо актуально в умовах дефіциту ресурсів та зростання попиту на швидке виробництво. Аналіз конструкцій БПЛА показав, що вибір матеріалів безпосередньо впливає на характеристики апарату, такі як вага, тривалість польоту, міцність та адаптованість до зовнішніх умов.

Використання методу аналізу ієрархій і методу експертних оцінок, дозволила здійснити обґрунтований вибір матеріалів для конкретних умов експлуатації. Цей підхід продемонстрував свою ефективність у визначенні найбільш раціональних матеріалів із врахуванням критеріїв, таких як міцність, щільність, ударна в'язкість і ціна.

Результати роботи мають практичну значущість, оскільки вони можуть бути використані для розробки нових моделей БПЛА, які відповідатимуть сучасним вимогам економічності, екологічності та адаптивності. Запропоновані матеріали дозволяють знизити вартість виробництва без шкоди для технічних характеристик, що є важливим фактором у розвитку як цивільних, так і військових проектів.

Отже, проведене дослідження не лише підтвердило перспективність використання деревини та інших альтернативних матеріалів у конструкціях БПЛА, а й надало практичні рекомендації для впровадження цих рішень у виробничі процеси. Подальший розвиток цього напрямку може бути зосереджений на тестуванні довговічності матеріалів, їхньої стійкості до екстремальних умов і масштабування технологій для масового виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Конструкція ротора та літальних БПЛА для польоту по заданій траєкторії з використанням телеметрії. Порівняння технологій, переваги та перспективи використання. Веб-сайт. URL: <https://miljournals.knu.ua/index.php/zbirnik/article/view/918> (дата звернення 23.10.2023)
2. Класифікація дронів: які види та типи бувають. Веб-сайт. URL: <https://www.bezpeka-shop.com/ua/blog/poleznye-sovety/klassifikatsiya-dronov-kakie-vidy-i-tipy-byvayut-chast-pervaya/> (дата звернення 23.10.2023)
3. Проект Архангел. Веб-сайт. URL: https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2024/02/metod_v3_1-0-1_compressed_%D0%B4%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B5%D1%83%D0%B4%D0%B0%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D1%8B.pdf (дата звернення 28.10.2023)
4. Інженер БПЛА. Базовий курс. Веб-сайт. URL: <https://prometheus.org.ua/prometheus-free/drone-engineering> (дата звернення 31.10.2023)
5. Трикоптер чи квадрокоптер – проблема вибору. Веб-сайт. URL: <https://modelistam.com.ua/trikopter-ili-kvadrokopter-problema-vybora-a-168/> (дата звернення 12.11.2023)
6. Що таке квадрокоптер. Веб-сайт. URL: <https://ukrdrone.com.ua/shho-take-kvadrokopter/> (дата звернення 16.11.2023)
7. Квадрокоптер DJI Mavic3 3T. Веб-сайт. URL: https://elmir.ua/ua/kvadrokopty_i_drony/quadrocopter_dji_mavic_3t_cp_en_00000415_01.html (дата звернення 17.11.2023)
8. FPV дрон ATONRC Insight7. Веб-сайт. URL: <https://rozetka.com.ua/ua/402541959/p402541959/> (дата звернення 19.11.2023)

9. Гексакоптер. Веб-сайт. URL: <https://modelistam.com.ua/ua/kvadrokoptery/geksakoptery-c-1340/> (дата звернення 25.11.2023)
10. Дрон-кур'єр «Баба – Яга». Веб-сайт. URL: <https://armyinform.com.ua/2024/07/24/dron-kuryer-baba-yaga-manna-nebesna-dostavymo-produkty-tudy-de-strilyayut-nevygadana-istoriya/> (дата звернення 29.11.2023)
11. Октокоптер R18 від «Аеророзвідка» - Український дрон, який нищить ворогів. Веб-сайт. URL: <https://mezha.media/2022/04/26/oktokopter-r18-vid-aerorozvidka/> (дата звернення 6.12.2023)
12. Announcing the DJI Spreading Wings S1000+. Веб-сайт. URL: <https://www.dji.com/newsroom/news/dji-spreading-wings-s1000-plus> (дата звернення 12.12.2023)
13. Класифікація дронів: які види та типи бувають? Веб-сайт. URL: <https://www.bezpeka-shop.com/ua/blog/poleznye-sovety/klassifikatsiya-dronov-kakie-vidy-i-tipy-byvayut-chast-pervaya/> (дата звернення 19.12.2023)
14. Бойові малорозмірні безпілотні літальні апарати з реактивною тягою. Веб-сайт. URL: <https://files.nas.gov.ua/PublicMessages/Documents/0/2023/10/23103112185520-1976.pdf> (дата звернення 20.01.2024)
15. Краще, ніж “Лелека”: волонтери готують для сил оборони дрони з надлегкого дерева. Веб-сайт. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-technology/3724172-krase-niz-leleka-volonteri-gotuut-dla-sil-oboroni-droni-z-nadlegkogo-dereva.html> (дата звернення 25.01.2024)
16. Вуглепластик у FPV-дронах та БПЛА. Веб-сайт. URL: <https://raptorcnc.com.ua/ua/a494527-karbon-fpv-dronah.html> (дата звернення 08.02.2024)
17. Карбоновая рама для FPV квадрокоптера Mark4. Веб-сайт. URL: <https://www.olx.ua/d/uk/obyavlenie/karbonovaya-rama-dlya-fpv-kvadrokoptera-mark4-IDTi0PX.html> (дата звернення 10.03.2024)

18. Пінопласт, скотч і без керма: з чого зроблений російський БПЛА-камікадзе. Веб-сайт. URL: <https://focus.ua/uk/digital/640398-pinoplast-skotch-i-bez-kerma-z-chogo-zrobleniy-rosiyskiy-bpla-kamikadze-foto> (дата звернення 15.04.2024)
19. Економверсія «Шахеда»: що відомо про нові російські дрони «Гербера». Веб-сайт. URL: <https://www.news365.org.ua/ekonomversiia-shaheda-sho-vidomo-pro-novi-rosiiski-droni-gerbera/> (дата звернення 25.04.2024)
20. Алюміній у конструкції дронів. Переваги легкості та міцності. Веб-сайт. URL: <https://pressa.rv.ua/news/alyuminij-u-konstrukcziyi-droniv-perevagy-legkosti-ta-micznosti/> (дата звернення 29.04.2024)
21. Волонтери розповіли про особливості дерев'яних дронів, які використовує РФ. Веб-сайт. URL: <https://mil.in.ua/uk/news/volontery-rozpovily-pro-osoblyvosti-derev-yanyh-droniv-yaki-vykorystovuye-rf/> (дата звернення 03.05.2024)
22. Фанера і пінопласт: Стало відомо, з чого зроблені нові російські дрони «Гербера». Веб-сайт. URL: <https://inforesist.org/ua/fanera-i-pinoplast-stalo-vidomo-z-chogo-zrobleni-novi-rosijski-droni-gerbera/> (дата звернення 01.08.2024)
23. Що таке склопластик: властивості та застосування. Веб-сайт. URL: <https://pkf-elektroplast.com.ua/ua/a494018-chto-takoe-stekloplastik.html> (дата звернення 05.08.2024)
24. Аеродинамічний опір та його види. Веб-сайт. URL: <https://dzudzylo.com/aviatsiya/aerodynamichnyy-opir-ta-yoho-vydy.html> (дата звернення 11.08.2024)
25. Стійкість до температур. Веб-сайт. URL: <https://naurok.com.ua/prezentaciya-do-uroku-abo-pidgotovki-do-zno-nmt-z-himi-351021.html> (дата звернення 15.08.2024)
26. Карбон. Веб-сайт. URL: <https://www.uzhnu.edu.ua/uk/infocentre/get/24349> (дата звернення 22.08.2024)

27. Фізичні властивості і технічні характеристики пінопласту. Веб-сайт. URL: <https://vikbud.ua/news/korisna-informatsiya/fizicheskie-svoystva-i-tehnicheskie-harakteristiki-penoplasta> (дата звернення 01.09.2024)
28. Алюміній як атом і хімічний елемент. Веб-сайт. URL: <https://www.miyklas.com.ua/p/himija/11-klas/neorganichni-rechovini-ta-yikhni-vlastivosti-359810/aliuminii-ta-iogo-spoluki-360930/re-bef7ed12-65c9-4760-abe6-05cf77995acf> (дата звернення 06.09.2024)
29. Деревина. Веб-сайт. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D0%B0> (дата звернення 10.09.2024)
30. Карбон. Веб-сайт. URL: <https://fpvdrone.com.ua/karbon-ua> (дата звернення 11.09.2024)
31. Вуглецеве волокно. Веб-сайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%83%D0%B3%D0%BB%D0%B5%D1%86%D0%B5%D0%B2%D0%B5_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BA%D0%BD%D0%BE (дата звернення 15.09.2024)
32. Що таке фанера?. Веб-сайт. URL: <https://pragmatec.com.ua/blog/vidy-i-tipy-fanery.html> (дата звернення 21.09.2024)
33. Фанера. Веб-сайт. URL: <https://torgplit.com.ua/ua/scho-take-fanera/> (дата звернення 24.09.2024)
34. Все про березу. Веб-сайт. URL: <http://zanoza.com.ua/biblioteka/oporodakh/214-vse-pro-berezu> (дата звернення 26.09.2024)
35. Березова дошка - плюси і мінуси деревини, застосування матеріалу. Веб-сайт. URL: <http://stroyka-gid.com.ua/zroby-svoimy-rykamys/8448-berezova-dochka.html> (дата звернення 29.09.2024)
36. Growth miracle of nature. The paulownia/ Веб-сайт. URL: <https://www.cathaia.com/> (дата звернення 30.09.2024)
37. Дослідження фізико-механічних властивостей швидкоростучих порід на прикладі павловнії. Веб-сайт. URL:

http://ir.polissiauniver.edu.ua/bitstream/123456789/12681/1/Kotyuk_V.V._K_R_205_2021.pdf (дата звернення 01.10.2024)

38. Застосування грабу. Веб-сайт. URL: <https://www.ueex.com.ua/presscenter/news/tsina-na-derevinu-graba-ii-vlastivosti-ta-osoblivosti-realizatsi/> (дата звернення 02.10.2024)
39. Властивості грабу. Веб-сайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D0%B0%D0%B1_%D0%B7%D0%B2%D0%B8%D1%87%D0%B0%D0%B9%D0%BD%D0%B8%D0%B9 (дата звернення 02.10.2024)
40. Граб. Веб-сайт. URL: <https://estrade.com.ua/derevyna-grab/> (дата звернення 02.10.2024)
41. Пінчевська О.О., Головач В.М. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни: «Інноваційні технології з оброблення деревини» / Пінчевська О.О., Головач В.М. – Київ: НУБіП України. 2021.
42. Що таке ХДФ?. Веб-сайт. URL: <https://artkone.com.ua/scho-take-hdf/> (дата звернення 05.10.2024)
43. Розривна машина Р-5. Веб-сайт. URL: <http://standart-m.com.ua/ispytatelnoe-oborudovanie/razryvnye-mashiny/razryvnaya-mashina-r-5> (дата звернення 09.10.2024)
44. Визначення границі міцності при згині. Веб-сайт. URL: <https://studfile.net/preview/5025280/page:7/> (дата звернення 10.10.2024)
45. Щільність і питома вага: Веб-сайт. URL: <http://bit.ly/48YyQS4> (дата звернення 12.10.2024)
46. Гіроскоп. Веб-сайт. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%96%D1%80%D0%BE%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BF> (дата звернення 19.10.2024)
47. Налаштування фільтрів FPV в Betaflight. Веб-сайт. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Wlc4EoptGGk> (дата звернення 21.10.2024)