

ВІДГУК

офіційного опонента

*на дисертацію Добродомова Олександра Олександровича на тему
«Синтез ефективних конструкторсько-технологічних рішень створення
твердопаливних стартових прискорювачів малих безпілотних літальних
апаратів»,*

*подану на здобуття ступеня доктора філософії
зі спеціальності 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»*

Актуальність теми дисертації

Стрімке поширення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) легкого класу в цивільній та оборонній сферах обумовлює підвищені вимоги до мобільності, автономності, оперативності розгортання і надійності їх стартових систем. Для значної частини літакового типу БПЛА застосування традиційного зльоту зі злітно-посадкової смуги або механічних катапульт пов'язане з потребою у підготовленій інфраструктурі, суттєвими габаритами стартового обладнання, обмеженнями за масою апарата та значними стартовими перевантаженнями. За таких умов використання твердопаливних ракетних прискорювачів є одним із найбільш перспективних способів забезпечення автономного запуску БПЛА з непідготовлених майданчиків.

Разом з тим ефективність системи «БПЛА-стартовий твердопаливний ракетний прискорювач (СТРП)» визначається не окремим параметром, а сукупністю взаємопов'язаних характеристик: масою і льотно-технічними характеристиками апарата, допустимим перевантаженням, потрібною кінцевою швидкістю, конструктивно-компонувальною схемою, законом зміни тяги прискорювача, геометрією паливного заряду, матеріалами корпусу і соплового блока, технологією виготовлення, параметрами адаптера та точністю експериментального відпрацювання. Відсутність цілісного методичного підходу до узгодження цих складових на ранніх стадіях проектування призводить до надмірної маси, невиправданого зростання вартості, ускладнення

виробництва або невідповідності прискорювача характеристикам конкретного БПЛА.

Додаткової актуальності роботі надає необхідність створення уніфікованих технічних рішень, придатних для серійного та масштабованого виготовлення СТРП, а також вітчизняної експериментальної бази для визначення тягово-часових характеристик, вектора тяги і верифікації розрахункових моделей СТРП. У цьому контексті розроблення методики визначення проєктних параметрів, алгоритму вибору способу запуску, лінійки універсальних прискорювачів, перехідної рами і високоточного тяговимірювального комплексу є актуальним науково-прикладним завданням.

Отже, тема дисертаційної роботи Добродомова О.О. є своєчасною, відповідає сучасним потребам авіаційної та ракетно-космічної техніки і має істотне значення для підвищення ефективності, універсальності та технологічності стартових систем малих безпілотних літальних апаратів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі ракетно-космічних та інноваційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара у межах держбюджетних науково-дослідних робіт «Створення і удосконалення матеріалів та технологій інноваційних та оборонної галузей промисловості» (державний реєстраційний номер 0122U001286, 2022-2024 рр.) та «Розробка універсальних твердопаливних ракетних прискорювачів БПЛА та зенітних ракет для перехоплення ударних БПЛА великого радіусу дії на їх основі» (державний реєстраційний номер 0126U001728, 2026-2028 рр.). Тематика дисертації безпосередньо відповідає напрямам зазначених робіт, а отримані результати мають прикладне значення для створення та експериментального відпрацювання перспективних стартових систем.

Наукова новизна та практичне значення отриманих результатів

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у формуванні цілісного підходу до синтезу конструкторсько-технологічних рішень стартових

прискорювачів малих БПЛА. Вперше розв'язано задачу узгодження проектних характеристик твердопаливного стартового прискорювача з масою БПЛА, допустимим перевантаженням, необхідною кінцевою швидкістю, умовами старту та компоновальною схемою у межах єдиної методики, достовірність якої підтверджено експериментально.

Дістали подальшого розвитку підходи до вибору матеріалів конструктивних елементів СТРП за комплексом міцнісних, масових, теплових, технологічних і вартісних критеріїв. Науково і технічно обґрунтовано можливість використання частини товщини корпусу як внутрішнього теплозахисного шару для короткочасно працюючих прискорювачів, що дозволяє спростити конструкцію і технологію виготовлення.

Подальшого розвитку набули принципи створення тяговимірювальних комплексів для короткочасних імпульсних режимів роботи СТРП. До нових результатів належать конструктивна схема універсального стенду, підхід до попереднього навантаження, калібрування методом ступінчастого навантаження-розвантаження, визначення не лише величини тяги, а й напрямку та координати точки прикладання її вектора.

Вперше для задач стартових прискорювачів малих БПЛА теоретично обґрунтовано доцільність застосування термопластичних зв'язувальних систем як технологічної альтернативи традиційним термореактивним системам. Практичне значення цього напрямку полягає у потенційному скороченні виробничого циклу, можливості повторного перероблення матеріалу та підвищенні гнучкості дрібносерійного виробництва.

Практичну цінність мають алгоритм вибору способу запуску, методика визначення тягово-часових характеристик, лінійка універсальних прискорювачів, універсальна перехідна рама, розрахунковий інструментарій і тяговимірювальний комплекс. Результати впроваджено у науково-технічну та проектну діяльність ПрАТ «РАМЗАЙ» і ТОВ «ФЛАЙТ КОНТРОЛ», а також у навчальний процес Дніпровського національного університету імені Олеся

Гончара. Результати захищено двома патентами України на корисну модель; подано дві заявки на винаходи.

Аналіз основного змісту роботи та дотримання академічної доброчесності

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, наведено застосовані методи, сформульовано наукову новизну та практичне значення, показано зв'язок роботи з науковими темами, особистий внесок здобувача, апробацію та публікації.

У першому розділі виконано ґрунтовний аналіз існуючих способів запуску безпілотних літальних апаратів, наведено їх класифікацію за видом джерела енергії, масою апарата та особливостями стартової інфраструктури. Проаналізовано запуск без зовнішнього пристрою, застосування механічних і газодинамічних катапульт, запуск із носія та використання хімічних акумуляторів енергії. Особливу увагу приділено конструктивно-компонувальним схемам розташування СТРП під фюзеляжем, у тандемній схемі та по бортах БПЛА. Проведено порівняння схем за критеріями стійкості, керованості, стартових перевантажень, кута запуску, складності інтеграції та можливості уніфікації.

У цьому ж розділі систематизовано конструкції і форми паливних зарядів, проаналізовано скріплені та вкладні заряди, традиційні й перспективні технології їх виготовлення, зокрема адитивні підходи. Розглянуто матеріали корпусів, заглушок і соплових елементів, а також методи дослідження характеристик твердопаливних прискорювачів. Проведений аналіз дав змогу визначити область раціонального застосування СТРП для автономного запуску БПЛА та сформулювати вимоги до подальшого проєктування.

Другий розділ присвячено системному підходу до розроблення та експериментального дослідження твердопаливних прискорювачів. Запропоновано методичні підходи до визначення проєктних характеристик для двох базових схем - розташування прискорювача під фюзеляжем і тандемного розташування. У розрахунках узгоджуються маса БПЛА, потрібна кінцева

швидкість, допустиме перевантаження, кут старту, час роботи, середня та максимальна тяга, сумарний імпульс і маса палива. Така постановка забезпечує формування проектного вигляду прискорювача не ізольовано, а як складової системи «БПЛА-СТРП».

Значну частину розділу присвячено вибору матеріалів корпусу, заглушок і критичного перерізу сопла за сукупністю міцнісних, масових, теплових, технологічних і вартісних критеріїв. Окремо досліджено сучасні та перспективні зв'язувальні системи твердих ракетних палив. Автор обґрунтовує доцільність використання термопластичних зв'язувальних речовин як альтернативи традиційним термореактивним матеріалам, що може забезпечити гнучкість технології, можливість повторного перероблення заряду і скорочення виробничого циклу.

У третьому розділі наведено розрахунково-експериментальну валідацію запропонованих підходів. Виконано розрахунок товщини корпусу з урахуванням можливості використання частини його товщини як внутрішнього теплозахисного шару. Розрахункову оцінку зіставлено з експериментально встановленою глибиною термічної деструкції; з урахуванням міцності та теплового впливу обґрунтовано конструктивну товщину корпусу. Це рішення спрямоване на відмову від окремого внутрішнього теплозахисного покриття для короткочасно працюючих прискорювачів та спрощення їх серійного виробництва.

Також у третьому розділі розроблено формалізований алгоритм вибору способу запуску БПЛА. Алгоритм послідовно враховує наявність злітно-посадкової смуги, вимоги до радіуса дії, тип платформи-носія, допустимі динамічні навантаження, експлуатаційні обмеження та компоновальні особливості апарата. Результатом є вибір одного з раціональних варіантів: зльоту з злітно-посадкової смуги, катапультного запуску, запуску з носія, застосування СТРП під фюзеляжем або у тандемній схемі, а також комбінованого старту.

У четвертому розділі представлено приклад практичного синтезу конструкторсько-технологічних рішень. Розроблено універсальну перехідну раму, яка складається з функціонально пов'язаних частин для приєднання БПЛА та прискорювача і забезпечує адаптацію різних типів двигунів до різних літальних апаратів. Обґрунтовано лінійку універсальних СТРП із сумарним імпульсом від 2589 до 10594 Н·с, що охоплює потреби запуску БПЛА з літною масою приблизно від 28 до 260 кг. Уніфікація типорозмірів скорочує номенклатуру виробів, спрощує технологічну підготовку виробництва та підвищує гнучкість застосування.

Експериментальне відпрацювання третього типорозміру з номінальним сумарним імпульсом 7610 Н·с засвідчило близькість фактичних і розрахункових характеристик. Середній сумарний імпульс за серією випробувань становив 7609,6 Н·с, середня тяга - 3172 Н, а коефіцієнти варіації основних параметрів не перевищували 1,15 %. Усі випробування відбулися штатно, без руйнування корпусу або аномальної роботи. Кидкові випробування підтвердили працездатність методики визначення проєктних характеристик: похибка становила близько 10 % для схеми з розташуванням прискорювача під фюзеляжем і 1,2 % для тандемної схеми.

Загальні висновки логічно узагальнюють результати виконаних завдань. Вони містять відомості про алгоритм вибору способу запуску, методику визначення параметрів, матеріалознавчі й технологічні рішення, тяговимірювальний комплекс, лінійку прискорювачів, універсальну раму, стендові та кидкові випробування, а також впровадження результатів і захист об'єктами права інтелектуальної власності.

За результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові збіги – дисертація має унікальність тексту 94,9%, а всі використані матеріали інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела, а отже дисертація є результатом самостійних досліджень здобувача і підтверджує опанування здобувачем методології наукової діяльності.

Дисертаційна робота Добродомова Олександра Олександровича «Синтез ефективних конструкторсько-технологічних рішень створення твердопаливних стартових прискорювачів малих безпілотних літальних апаратів» за своїм змістом та спрямованістю повністю відповідає вимогам спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка та є повністю завершеним дослідженням.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та їх достовірність

Наукові положення і висновки дисертації ґрунтуються на фундаментальних законах механіки, динаміки польоту, внутрішньої балістики, міцності та теплопередачі, а також на апробованих інженерних методах проєктування твердопаливних ракетних двигунів. Використані математичні моделі мають чітко визначене фізичне підґрунтя, а основні розрахункові результати підтверджено натурними експериментами. Достовірність експериментальних даних забезпечено метрологічним опрацюванням вимірювального каналу, калібруванням тензодатчиків, статистичним аналізом серії випробувань і зіставленням із номінальними параметрами.

Висновки до розділів і загальні висновки відповідають поставленим завданням, відображають отримані результати та не виходять за межі проведених досліджень. Рекомендації щодо подальшого застосування розроблених методик і конструкцій є технічно обґрунтованими.

Публікація та апробація основних результатів дисертаційної роботи.

Основні результати дисертації відображено у п'яти статтях у наукових фахових виданнях України категорії «Б», у тому числі в одній одноосібній статті. Результати роботи також оприлюднено у п'ятнадцяти публікаціях у матеріалах міжнародних наукових конференцій, дві з яких індексуються у наукометричній базі Scopus. Отримано два патенти України на корисні моделі «Установка для запуску літальних апаратів» і «Стартовий прискорювач», а також подано дві заявки на винаходи за відповідними технічними рішеннями.

Зміст опублікованих праць і об'єктів інтелектуальної власності достатньою мірою відображає основні положення та практичні результати дисертації.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота Добродомова Олександра Олександровича написана українською мовою, має змістовну цілісність та послідовність, наявні граматичні, стилістичні та орфографічні помилки які не впливають на загальне сприйняття викладеного матеріалу.

Зауваження та дискусійні положення до дисертаційної роботи

1. У вступі в описі структури зазначено, що дисертація складається з трьох розділів, тоді як фактично робота містить чотири розділи.

2. Розроблена методика визначення проєктних параметрів базується на низці спрощень щодо характеру руху БПЛА на стартовій ділянці. Доцільно було б чіткіше подати область застосовності моделей, граничні умови та вплив аеродинамічного опору, поривів вітру, зміни маси системи і відхилення вектору тяги на точність розрахунку, особливо для схеми розташування прискорювача під фюзеляжем, для якої за результатами кидкових випробувань отримано більшу похибку.

3. Багатокритеріальний вибір матеріалів конструктивних елементів виконано з урахуванням міцності, маси, теплостійкості, технологічності та вартості, однак порядок нормування критеріїв і визначення їх вагових коефіцієнтів розкрито недостатньо. Наведення формалізованої процедури ранжування матеріалів підвищило б відтворюваність запропонованого підходу.

4. Обґрунтування перспективності термопластичних зв'язувальних речовин переважно спирається на порівняльний аналіз, термохімічне моделювання та літературні дані. Робота була б ще переконливішою за наявності окремої програми експериментальних досліджень механічних, реологічних, термостійких і балістичних характеристик конкретного термопластичного паливного складу.

5. Параметри лінійки універсальних прискорювачів обґрунтовано для заданого діапазону мас і сумарних імпульсів, однак критерії формування меж окремих типорозмірів і ступінь перекриття їх областей застосування наведено стисло. Корисним було б доповнити роботу техніко-економічним порівнянням типорозмірів, оцінкою собівартості та показників уніфікації порівняно з розробленням індивідуального прискорювача для кожного типу БПЛА.

6. Запропонований алгоритм вибору способу запуску має практичну спрямованість, проте частина порогових умов у блок-схемі сформульована якісно. Доцільно деталізувати правила прийняття рішень, обґрунтувати числові пороги і продемонструвати роботу алгоритму на розширеній вибірці БПЛА різних аеродинамічних схем, що створило б передумови для його програмної реалізації у вигляді інженерної системи підтримки рішень.

Наведені зауваження мають переважно уточнювальний і рекомендаційний характер, не ставлять під сумнів основні наукові положення, достовірність отриманих результатів і загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Загальні висновки про дисертаційну роботу

Дисертаційна робота Добродомова Олександра Олександровича «Синтез ефективних конструкторсько-технологічних рішень створення твердопаливних ракетних прискорювачів малих безпілотних літальних апаратів» є завершеною, самостійно виконаною кваліфікаційною науковою працею, у якій отримано нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі синтезу ефективних конструкторсько-технологічних рішень стартових прискорювачів малих БПЛА.

Сукупність одержаних результатів - методика узгодження параметрів БПЛА і прискорювача, алгоритм вибору способу запуску, матеріалознавчі й технологічні рішення, універсальний тяговимірювальний комплекс, лінійка типорозмірів СТРП, перехідна рама та результати експериментальної верифікації - має наукову новизну, практичну цінність і відповідає спеціальності 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка».

За актуальністю, обсягом виконаних теоретичних і експериментальних досліджень, ступенем обґрунтованості наукових положень, достовірністю результатів, рівнем апробації, кількістю публікацій і практичним впровадженням дисертаційна робота відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 № 44.

Вважаю, що Добродомов Олександр Олександрович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» з галузі знань 13 «Механічна інженерія».

Офіційний опонент:

Кандидат технічних наук, старший науковий
співробітник відділу термогазодинаміки
енергетичних установок
Інституту технічної механіки
Національної академії наук України і
Державного космічного агентства України



Олександр ІГНАТЬЄВ



Підпис Ігнат'єва О.Д. завіряю

Вчений секретар ІТМ НАНУ і ДКАУ, к.т.н.



Людмила ЛАПІНА