

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу
Стрембовського Володимира Васильовича
на тему «Оптимізація траєкторій руху космічних об'єктів в атмосфері
Землі за тепловим чинником»,
подану на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 113
Прикладна математика

Актуальність теми дослідження.

У сучасних умовах стрімкого розвитку космічної галузі спостерігається різке зростання кількості запусків супутників, орбітальних апаратів і фрагментаційних подій, що призводить до небезпечного накопичення космічного сміття, особливо на низьких навколоземних орбітах (LEO). Наявність тисяч нефункціонуючих космічних об'єктів (КО) створює серйозну загрозу для чинних і перспективних космічних місій, а також для глобальної космічної інфраструктури.

Перспективним напрямком подолання цієї проблеми є кероване зведення об'єктів з орбіти з метою їх повного згоряння в атмосфері Землі. Водночас для забезпечення ефективності та безпеки такого процесу необхідно оптимізувати траєкторії спуску таким чином, щоб гарантувати повну термічну деструкцію об'єкта та виключити ризик досягнення уламками поверхні Землі.

Розв'язання цієї складної задачі лежить на перетині галузей аеродинаміки, термодинаміки, оптимального керування та сучасних комп'ютерних технологій. Використання методів штучного інтелекту, машинного навчання, генетичних алгоритмів і математичного моделювання дозволяє створити нові ефективні підходи до розробки технологій активного або комбінованого видалення космічного сміття.

Актуальність дослідження зумовлена не лише глобальним характером проблеми, а й національними інтересами. Україна, як держава з потужним науково-технічним потенціалом у сфері космічних досліджень, має стратегічну зацікавленість у розробці й впровадженні інноваційних рішень, спрямованих на забезпечення екологічної безпеки космічного простору.

Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з індивідуальним планом підготовки аспіранта та в рамках держбюджетної теми «Теоретичне і експериментальне обґрунтування автофажних систем відведення космічних об'єктів з низьких навколоземних орбіт» (№ 0120U102254), що фінансувалася Міністерством освіти і науки України в Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара.

Формулювання наукової задачі дисертації.

Дисертаційна робота характеризується чітким та коректним формулюванням наукової задачі.

Метою роботи була розробка інтегрованої методики прогнозування максимальних теплових навантажень та вибору траєкторних параметрів руху космічних об'єктів в атмосфері Землі на основі поєднання методів машинного навчання і генетичної оптимізації.

Наукові завдання, поставлені та реалізовані автором з метою досягнення поставленої мети дисертаційного дослідження, включали наступне:

1. Аналітичний огляд існуючих математичних моделей та інженерних методик прогнозування аеродинамічного нагріву КО; виокремлення кола підзадач, у яких традиційні підходи демонструють обмежену точність або надмірні обчислювальні витрати.
2. Формування репрезентативного датасету, що охоплює траєкторні, геометричні та фізико-механічні параметри КО; забезпечення очищення, нормалізації та генерації розширених комбінацій вхідних ознак для подальшого моделювання.
3. Проектування, навчання та валідація моделей машинного навчання з подальшою оцінкою їх ефективності та вибором оптимальної архітектури.
4. Побудова генетичного алгоритму для пошуку оптимальних траєкторних параметрів, що максимізують інтегральне теплове навантаження на критичному інтервалі.
5. Узагальнення рекомендацій щодо вибору початкових умов входу для різних типових класів космічних об'єктів; формулювання практичних вказівок для проектування місій активного або комбінованого видалення сміття з урахуванням теплового чинника.

Вважаю що

об'єкт дослідження – процес керованого відведення космічного сміття з орбіти шляхом входу в атмосферу Землі,

та

предмет дослідження – математичні моделі та алгоритми оптимізації траєкторій зниження КО з урахуванням теплового навантаження, зокрема на основі машинного навчання та генетичних алгоритмів.

відповідають поставленим завданням і забезпечують комплексний підхід до вирішення наукової задачі.

Наукова новизна отриманих автором результатів. Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що **вперше**:

- **розроблено** модель машинного навчання для всебічної оцінки теплових навантажень на КО, що рухається в атмосфері Землі; запропонована модель дозволила **провести** комплексний аналіз впливу траєкторних параметрів на формування теплових потоків;

- запропоновано гібридний обчислювальний фреймворк, що поєднує машинне навчання для прогнозування характеристик теплового потоку та генетичний алгоритм для оптимізації параметрів траєкторії входу в атмосферу Землі. Запропонована методика слугує інструментом для обґрунтованого вибору КО, для яких доцільним є відведення в атмосферу Землі, оскільки це забезпечує повне їх згоряння без утворення небезпечних уламків.

Практичне значення дослідження полягає у розробці методики для розрахунку та оптимізації траєкторій керованого зведення космічних об'єктів з орбіти з урахуванням теплового навантаження, що може бути безпосередньо використана під час проектування місій активного видалення космічного сміття для обґрунтованого вибору параметрів входу в атмосферу. Це дозволяє забезпечити гарантоване згоряння об'єкта без утворення небезпечних фрагментів, здатних досягти поверхні Землі або залишитися на орбіті.

Крім того, робота може слугувати прикладом міждисциплінарного дослідження на перетині космічної механіки, термодинаміки, оптимізації та штучного інтелекту.

Достовірність отриманих результатів ґрунтується на строгій фізико-математичній постановці задачі та використанні апробованих методів машинного навчання й еволюційної оптимізації. Результати були верифіковані шляхом контролю точності обчислень та успішної валідації розробленої моделі на незалежному наборі експериментальних даних, що підтверджує їх **надійність та обґрунтованість**.

Публікації та особистий внесок здобувача.

Основні результати роботи викладено в 4 працях, серед яких 2 входять до наукометричної бази Scopus, 2 опубліковані у фахових виданнях України категорії Б. Усі основні ідеї, розрахунки та результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно.

Структура та обсяг дисертації.

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Список літератури складається з 195 джерел, більшість з яких – англomовні. Робота містить 40 рисунків та 15 таблиць. Загальний обсяг становить 154 сторінки, що відповідає вимогам освітньо-наукової програми «Прикладна математика».

Робота оформлена відповідно до чинних стандартів, добре структурована та написана фаховою мовою. Матеріал викладено логічно та

послідовно, забезпечуючи цілісність та інформативність викладу. Методологічна частина роботи вирізняється високим рівнем деталізації. Наочність представлених результатів забезпечується якісним ілюстративним матеріалом, який добре інтегрований у текст та містить необхідні пояснення, що робить технічний зміст роботи доступним для сприйняття.

У вступі здобувачем надано всебічне обґрунтування актуальності теми на тлі зростаючих ризиків, пов'язаних із космічним сміттям. У цьому розділі чітко окреслено зв'язок дослідження з чинними науковими програмами, сформульовано мету та задачі, визначено об'єкт і предмет, а також підкреслено наукову новизну та практичну цінність роботи.

Перший розділ присвячено розширеному аналітичному огляду сучасного стану проблеми. В ньому критично проаналізовано класичні напівемпіричні та CFD-підходи до оцінки теплових навантажень, а також розглянуто технології видалення космічного сміття. Розділ завершується висновком про провідну роль кута входу та початкових кінематичних параметрів у формуванні нагріву та формулюванням невирішених науково-прикладних питань, що визначають напрямок подальшого дослідження.

У другому розділі розроблено ключову фізико-математичну модель руху космічного об'єкта та сформульовано задачу максимізації інтегрального теплового навантаження з урахуванням відповідних обмежень. Основним елементом розділу є обґрунтування інноваційної гібридної схеми «машинне навчання + генетичний алгоритм». Цей підхід поєднує швидке нейромережеве прогнозування теплових навантажень із глобальним еволюційним пошуком оптимального кута входу, а також визначає критерії прийнятності розв'язків.

Третій розділ детально описує ретельну процедуру підготовки даних, починаючи з формування навчального датасету з каталогу ESA DISCOS. Проведено статистичний аналіз для підтвердження релевантності ознак та відсутності мультиколінеарності. У розділі описано вибір архітектур машинного навчання та їх налаштування, а також продемонстровано інтеграцію підготовлених моделей у подальший процес генетичної оптимізації.

Четвертий розділ дисертації представляє результати практичної реалізації розробленої методики. Виконано фінальне навчання та порівняльну оцінку нейромереж, де Transformer-модель продемонструвала найвищий рівень узагальнення, підтверджений зовнішньою валідацією на незалежних даних ESA. Використовуючи цю модель як функцію пристосованості, було проведено серію експериментів з генетичної оптимізації для різних масово-геометричних конфігурацій. За результатами цих експериментів було отримано оптимальні кути входу та відповідні інтегральні теплові

навантаження, що стало основою для формування практичних рекомендацій щодо параметрів деорбітальних маневрів.

Висновки узагальнюють основні результати дослідження, підкреслюють їхню новизну та практичну цінність, а також окреслюють можливі напрями подальших досліджень.

Вважаю, що дисертаційна робота Стрембовського В. В. є самостійним та завершеним науковим дослідженням, що характеризується актуальністю, сучасним науковим рівнем, новизною результатів та їх прикладною цінністю. Результати, отримані в роботі, відповідають заявленій темі та вимогам до змісту дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика (ОНП «Прикладна математика»).

Високо оцінюючи представлену Стрембовським В. В. наукову роботу, вважаю за доцільне висловити деякі зауваження та побажання:

1. У роботі використовується напівемпірична формула (1.3) для теплового потоку в точці гальмування. Це є сильним спрощенням моделі теплового потоку. Наскільки правомірно екстраполювати висновки, зроблені для однієї точки, на процес термічної деструкції всього об'єкта, особливо враховуючи його складну геометрію та неконтрольоване обертання під час входу в атмосферу?
2. В дисертаційному дослідженні оптимізується інтегральне тепло, що є непрямим критерієм руйнування. Логічним наступним кроком було б розглянути процеси абляції, що дозволило б оптимізувати не просто тепловий потік, а безпосередньо ступінь руйнування об'єкта.
3. У моделі аеродинамічного нагріву не розглядається радіаційна складова теплового потоку $q_{s\,rad}$ (формула 1.4). Наскільки це впливає на фінальну температуру поверхні та інтегральне теплове навантаження, особливо на пологих траєкторіях, де час нагріву є великим?
4. Робота не позбавлена технічних помилок, одруків та русизмів, на кшталт:
 - у Додатку А нумерація публікацій починається з №5. Це виглядає як технічна помилка, яку варто виправити;
 - (Вступ, стор. 12): «Використання моделей аеродинамічного нагріву, оптимального керування, машинного навчання та генетичного оптимізації дозволяє створює новий високоефективний підхід для проєктування новітніх активних і комбінованих методів та технологій відведення космічного сміття.»;
 - (Висновки, стор. 125): «...що дозволило застосувати її в якості сурогата у процесі оптимізації.» рекомендую замінити на стилістично

правильні українські відповідники «як» або «в ролі». Виправлений варіант: «...що дозволило застосувати її **як** сурогат у процесі оптимізації.».

Проте вказані зауваження не знижують в цілому високої оцінки виконаної роботи.

Загальний висновок. Вважаю, що аспірант Стрембовський В. В. в процесі виконання дисертаційної роботи повністю оволодів методологією наукової діяльності. У процесі дослідження здобуто результати, що мають суттєве наукове значення та є особистим внеском автора. Дисертація Стрембовського Володимира Васильовича «Оптимізація траєкторій руху космічних об'єктів в атмосфері Землі за тепловим чинником» є закінченою науковою працею, яка відповідає всім 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 р. № 44 (зі змінами), а її автор заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Рецензент:

доцент кафедри

аерогідромеханіки та енергомасопереносу

Дніпровського національного

університету імені Олеся Гончара

кандидат технічних наук, доцент

Олександр ГУБІН

Підпис к.т.н. наук, доцента Губіна О. І. засвідчую

Проректор з наукової роботи Дніпровського національного університету

імені Олеся Гончара

Олег МАРЕНКОВ

