УДК 621.45.03:004.89:621.762
DOI:10.62717/3083-7057-2026-1-034

Сукачевський В.О.,
Дніпровський державний університет імені Олеся Гончара
ORCID 0009-0002-5251-6730
E-mail: vsukachevskyi@gmail.com

Ліповський В.І.,
Дніпровський державний університет імені Олеся Гончара
ORCID 0000-0002-7939-7973
E-mail: lealvi@ukr.net

ЕВОЛЮЦІЯ ПІДХОДІВ ДО ПРОЄКТУВАННЯ РАКЕТНИХ ДВИГУНІВ

Анотація. У роботі проаналізовано трансформацію підходів до проєктування ракетних двигунів: від емпіричних випробувань до впровадження систем сучасних технологій та підходів. Розглянуто роль штучного інтелекту в проєктуванні та виготовлені конструкцій та значення адитивних технологій для створення складних вузлів. Особливу увагу приділено специфічним викликам української ракетно-космічної галузі, зокрема необхідності поєднання високої технологічності зі швидкістю та економічністю виробництва. Автори підкреслюють, що зв'язок «цифри» та «заліза» є критичним для забезпечення прогностичного обслуговування та інтелектуалізації проектування.
Ключові слова: ракетні двигуни; штучний інтелект; адитивні технології; інтелектуальне проєктування; сучасні підходи.

V. Sukachevskyi,
Oles Honchar Dnipro National University
ORCID 0009-0002-5251-6730
E-mail: vsukachevskyi@gmail.com

V. Lipovkyi,
Oles Honchar Dnipro National University
ORCID 0000-0002-7939-7973
E-mail: lealvi@ukr.net

EVOLUTION OF APPROACHES TO ROCKET ENGINE DESIGN

Annotation. The paper analyzes the transformation of rocket engine design approaches: from empirical testing to the implementation of modern technologies and methodologies. The role of artificial intelligence in the design and manufacture of structures, as well as the significance of additive technologies for creating complex components, are examined. Attention is paid to the specific challenges of

the Ukrainian rocket and space industry, notably the need to combine high technology with speed and cost-effectiveness of production. The authors emphasize that the transition from "metal" to "digital" is critical for ensuring predictive maintenance and the intellectualization of design.
Keywords: rocket engines; artificial intelligence; additive technologies; intelligent design; modern approaches.

Розвиток ракетного двигунобудування сьогодні визначається не лише прагненням до максимальних енергетичних характеристик, а й адаптивністю до критичних умов виробництва. Зміна парадигм проєктування відбувалася паралельно із ростом обчислювальних потужностей, пройшовши шлях від натурних випробувань до сучасних концепцій з використанням передових технологій та підходів.

Хоча перші згадки про ракетні двигуни існували у часи стародавнього Китаю, історично першим етапом прийнято вважати першу половину XX століття. У цей період було домінування експериментального відпрацювання. Основним критерієм виступала роботоспроможність системи, що досягалася через численні ітерації «проєктування – аварійний запуск – аналіз дефектів». Це вимагало колосальних ресурсних витрат, проте дозволило створити базу надійних, робочих рішень. Розрахунки проводилися графоаналітичними методами. Через неможливість точного моделювання динамічних процесів, конструктори закладали високі коефіцієнти запасу міцності. Висока надійність відпрацьованого результату та створення унікальної бази практичних знань про граничні режими роботи стало інженерам того часу високою вартістю розробки, надлишковою масою конструкції та високим ризиком втрати дорогого обладнання під час стендових випробувань.

Другим, основним етапом можна виділити впровадження стандартних розрахункових програм, систем CAD/CAE та подібних (друга половина XX століття) [1]. Це трансформувало галузь, дозволивши замінити частину вогневих стендових випробувань математичним моделюванням, з’явилась можливість оптимізації внутрішньої геометрії. Використання методів CFD (обчислювальна гідрогазодинаміка) та FEA (скінчено-елементний аналіз) дало змогу оптимізувати масу та теплові режими, проте моделі залишалися без зворотного зв’язку з реальним виробом і не враховують знос або виробничі дефекти в реальному часі та існує висока залежність від точності вхідних граничних умов.

Сучасний підхід (XXI століття) базується на технології цифрових двійників (Digital Twins) та PDM (управління даними про продукт). Як зазначено у дослідженні [1], цифровий двійник дозволяє здійснювати безперервний моніторинг параметрів двигуна на всіх етапах життєвого циклу. Це забезпечує потокове обслуговування та мінімізацію ризиків при багаторазовому використанні.

Окремим критичним етапом для української ракетно-космічної галузі став період повномасштабної війни. Перед вітчизняними розробниками постали специфічні виклики:

1. Масштабованість та швидкість: Необхідність швидкого розгортання виробництва в умовах обмеженої промислової бази.

2. Економічна доцільність: Двигун має бути «дешевим» та доступним для масового випуску, не втрачаючи при цьому технологічної переваги над ворогом.

3. Технологічний симбіоз: Поєднання передових методів (3D-друк, CFD, штучний інтелект (ШІ), різноманітна оптимізація) із доступними матеріалами та спрощеними схемами керування.

На сучасному етапі штучний інтелект (ШІ) застосовується для генеративного дизайну, прискорення чисельних розрахунків та автоматичного створення оптимальних конструкцій, що особливо ефективно при проєктуванні деталей для адитивного виробництва. ШІ виступає інструментом підсилення інженерного проектування [2]. ШІ здатний в реальному часі корегувати роботу виготовлення двигуна, компенсуючи можливі відхилення у виготовленні компонентів, що є ключовим для «швидкого» виробництва. Застосування адитивних технологій дозволяє виготовляти цілі вузли ракетних двигунів з використанням новітніх матеріалів та з застосуванням цікавих конструктивних рішень, що не були доступні раніше, при використанні традиційних способів виготовлення конструкцій [3].

Використання таких інструментів як ШІ та адитивні технології дозволяють, радикально зменшити кількість деталей та вузлів у конструкції та мати адаптивність до мінливих умов виробництва. Проте залишаються такі проблеми як високі вимоги до обчислювальної інфраструктури та необхідність розробки нових методик для врахування особливостей, що приносять нові інструменти у конструктив виробів [3].

Отже, еволюція підходів демонструє перехід від «цифри» до «заліза», а синтез ефективних рішень при проєктуванні ракетних двигунів з застосуванням комп'ютерно-інтегрованих середовищ стає дуже важливим. Для України є актуальним поєднання високих технологій з максимальною спрощеністю конструкцій, що дозволяє створювати ефективні зразки ракетно-космічної техніки у найкоротші терміни.

Бібліографічні посилання

1. X. Fei, Q. Fengchen, S. Bing and F. Yuzhu, "Digital Twin of Solid Rocket Motor, Problem and Challenge," 2018 11th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), Hangzhou, China, 2018, pp. 7-11, doi: 10.1109/ISCID.2018.10103.
2. Sukachevskyi, V., & Shevtsov, V. (2024). Application of computer-integrated technologies in rocket engine design. *Challenges and Issues of Modern Science*, *3*, 62–73. https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/201

3. Sukachevskyi, V., & Lipovkyi, V. (2025). METHODOLOGY FOR REFINEMENT OF HYDRAULIC LOSSES IN THE DESIGN OF ADDITIVELY MANUFACTURED LIQUID ROCKET ENGINES. *Journal of Rocket-Space Technology*, *34*(4), 3-9. https://doi.org/10.15421/452540