

## АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА

УДК 681.5

DOI <https://doi.org/10.32782/EIS/2024-106-1>

### ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАРЯДУ ДЕТОНАЦІЙНОГО ДВИГУНА

#### **Бублік Андрій Вікторович,**

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем  
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»  
ORCID ID: 0000-0003-3015-6754  
SCOPUS ID: 55998596600

#### **Прядко Наталія Сергіївна,**

доктор технічних наук, професор,  
с.н.с., завідувач відділом термогазодинаміки  
Інституту технічної механіки  
Національної академії наук України і Державного космічного агенства України  
ORCID ID: 0000-0003-1656-1681  
SCOPUS ID: 57192887460

#### **Василів Степан Степанович,**

кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник відділу термогазодинаміки  
Інституту технічної механіки  
Національної академії наук України і Державного космічного агенства України  
ORCID ID: 0009-0000-0815-6323  
SCOPUS ID: 58188737800

#### **Зибалов Дмитро Сергійович,**

асистент кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем  
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»  
ORCID ID: 0000-0001-5891-9325

#### **Карпов Олександр Володимирович,**

аспірант кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем  
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»  
ORCID ID: 0009-0001-9056-0209

***Мета** полягає в обґрунтуванні рішень щодо автоматизації процесу виготовлення заряду детонаційного двигуна за новою технологією з використанням 3D-друкування, що забезпечить збільшення продуктивності та зменшення питомих енерговитрат, а також витрат матеріалів під час виготовлення заряду.*

***Метод.** Для обґрунтування рішень щодо автоматизації процесу виготовлення заряду детонаційного двигуна використано теоретичні методи – аналіз наявних рішень та їх недоліків, узагальнення мети дослідження та її декомпозиція на локальні задачі, пояснення за умови обґрунтування наукових методів, що планується використати для розв'язання поставлених завдань.*

***Результати.** Проведений аналіз наявних рішень щодо автоматизації процесу виготовлення заряду детонаційного двигуна показав, що існують рішення стосовно виготовлення компонентів ракетних двигунів за допомогою технології 3D-друкування, але для твердопаливних двигунів це завдання залишається не розв'язаним, зокрема через відсутність системного підходу, який передбачає інтеграцію елементів автоматизації в технологічне обладнання на глибокому рівні. Аналіз установки щодо виготовлення заряду для детонаційного двигуна як об'єкта автоматизації показав, що за умови автоматизації процесу*

3D-друкування заряду повинні враховуватись фізичні властивості матеріалу, що відрізняються від тих, що наразі використовуються. Крім того, керування 3D-друкуванням має відбуватися скоординовано з керуванням процесом сушіння нанесених шарів заряду.

**Практичне значення.** Сформовані ідея, мета й завдання дослідження дозволять створити новий підхід щодо автоматизації процесу виготовлення заряду детонаційного двигуна на основі технології 3D-друкування. У підсумку це дозволить створити швидкодіючі газодинамічні органи керування зенітної ракети, що є особливо актуальним для підвищення обороноздатності України.

**Ключові слова:** 3D-друкування, автоматизація процесу виготовлення заряду, детонаційний двигун.

### **Bublikov Andrii, Priadko Nataliia, Vasyliv Stepan, Zybalov Dmytro, Karpov Oleksandr. Peculiarities of automation of manufacturing a detonation motor charge**

**The goal** is to justify decisions regarding the automation of the manufacturing process of the detonation engine charge using a new technology 3D printing, which will ensure an increase in productivity and a decrease in specific energy consumption and material consumption during the manufacture of the charge.

**Method.** Theoretical methods were used to substantiate the decisions regarding the automation of the process of manufacturing the charge of the detonation engine – analysis of existing solutions and their shortcomings, generalization of the research goal and its decomposition into local tasks, explanations on the condition of substantiation of scientific methods that are planned to be used in solving the tasks.

**The results.** The analysis of existing solutions for automating the manufacturing process of the detonation engine charge and their shortcomings showed that there are solutions for the manufacturing of rocket engine components using 3D printing technology, but for solid fuel engines this task remains unsolved, in particular, due to the lack of a system approach that involves the integration elements of automation in technological equipment at a deep level. The analysis of the installation for the manufacture of a charge for a detonation engine as an object of automation showed that, under the condition of automation of the process of 3D printing of the charge, the physical properties of the material, different from those currently used, should be taken into account. In addition, the control of 3D printing must be coordinated with the control of the drying process of the deposited charge layers.

**Practical significance.** The formed idea, goal and tasks of the research will allow to create a new approach to the automation of the manufacturing process of the detonation engine charge based on 3D printing technology. As a result, this will make it possible to create fast-acting gas-dynamic controls of an anti-aircraft missile, which is especially relevant for increasing Ukraine's defense capabilities.

**Key words:** 3D printing, automation of the charge manufacturing process, detonation engine.

**Вступ.** Відомо, що ракети протиповітряної оборони повинні мати високу маневреність для компенсації промаху на кінцевій ділянці траєкторії польоту до цілі [1]. Це досягається значними боковими перевантаженнями, які для ракет 5В55 комплексу «С-300» та 9М38 комплексу «Бук-М1» мають значення 20–30 г. Вони показали свою ефективність проти розвідувальних та ударних БПЛА, крилатих ракет та літаків, однак вони не в змозі збивати оперативні-тактичні балістичні, високошвидкісні крилаті та аеробалістичні ракети, якими росіяни обстрілюють територію України. Тому перспективні комплекси повинні будуватися з урахуванням указаних вище недоліків і мати кращі характеристики. Досягнути великих значень тяги за малого часу роботи можна за допомогою детонаційного шнурового ракетного двигуна. Робочим тілом його є не продукти горіння, а детонації вибухівки, що характеризується вищими швидкостями та меншими тепловими втратами.

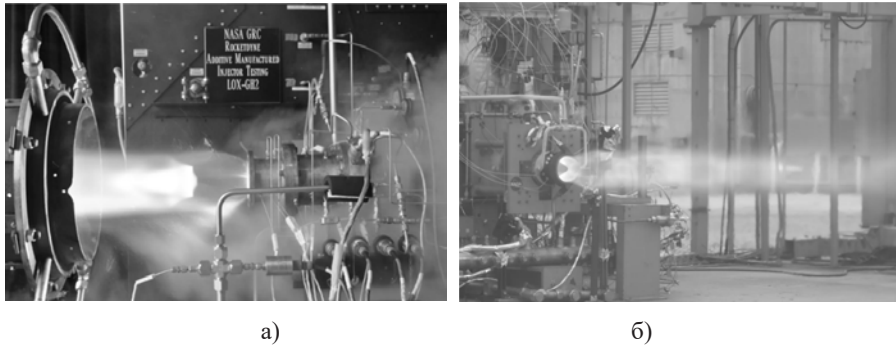
З огляду на це актуальність роботи зумовлена необхідністю створення способу автоматизації процесу виготовлення елементів високошвидкісних двигунів для корекції траєкторії зенітної ракети, зокрема заряду.

**Метод.** На першому кроці розв'язання поставленого завдання автоматизації технологічного

процесу виготовлення заряду детонаційного двигуна на основі використання технології 3D-друкування здійснено аналіз відомих рішень у цьому напрямі й такого процесу з позиції автоматизації. У ході роботи використано такі теоретичні методи: аналіз – для огляду наявних рішень та визначення їх недоліків; узагальнення – для формування мети дослідження, а також її декомпозиції на локальні задачі; пояснення – для обґрунтування наукових методів, які планується використати для розв'язання поставлених завдань.

**Результати.** Для космічної галузі використання 3D-друкування дозволяє виготовляти складні за формою деталі форсуночних головок або стінку камери згорання з каналами для регенеративного охолодження (рис. 1 а, б) [2; 3].

Але більш цікавим є застосування технології для безпосереднього виготовлення компонентів палива для двигунів. Наприклад, для гібридних двигунів застосовується друкована пластикова шашка, через канал якої пропускають окислювач [4]. З метою створення умов для запуску двигуна на монопаливі на основі нітрату гідроксиламонію використовувався гібридний газогенератор, який працював на газоподібному кисні та друкованій шашці



**Рис. 1. Випробування: друкованої мідної камери згорання, що працює на водні-кисні; а); ротаційного детонаційного ракетного двигуна, що працює на метані-кисні**

з акрилонітрилбутадієнстиролу (рис. 2). Особливість матеріалу полягає в тому, що він має певну електропровідність у напрямку волокон, створених під час друку. У разі пропускання через шашку струму з напругою порядку  $\sim 100\text{В}$  у середовищі газоподібного кисню шашка загоряється. Під час горіння виділяється сажа, яка сприяє надалі займанню пластику.



**Рис. 2. Робота гібридного газогенератора монопаливного рідинного двигуна**

Тобто відпрацьовано багаторазову гібридну систему запалювання двигуна. Окрім друку полімерними матеріалами, як-от поліетилен, акрилонітрилбутадієнстирол, поліактидна кислота та ін., цікавим є завдання здійснення 3D-друкування з енергоємних матеріалів. Таким є, наприклад, тверде ракетне паливо. Особливістю цього процесу з позиції автоматизації є високі вимоги до техніки безпеки, автоматизація процесів завантаження матеріалу та зняття готового виробу зі стола принтера, а також забезпечення штучного клімату в камері друкування щодо температурного режиму й вологості. Важливим фактором, який впливає на безпеку процесу друкування енергоємними матеріалами, є засоби для зниження накопичення

електростатичних зарядів, що може спричинити займання енергоємних матеріалів. Ці особливості надалі буде уточнено й ураховано під час автоматизації процесу виготовлення заряду.

Результати експериментальних досліджень [5] продемонстрували високі енергетичні характеристики, яких можна досягнути під час реалізації детонації в камері згорання. Разом із тим стало очевидним, що для організації процесу необхідно створити демпфер, в який можна укласти детонаційний шнур, котрий, з одного боку, гасив інтенсивність ударної хвилі, щоб детонація не передавалася на сусідні витки, а з іншого – легко газифікувався для отримання високих значень питомої тяги. Це завдання за умови виготовлення детонатора в широкому масштабі неможливо виконати без розроблення устаткування з глибоким інтегруванням у нього системи автоматизації. При цьому, ураховуючи фізичні властивості матеріалу, з якого виготовляється детонатор, окрім завдання автоматизації руху фіксатора з трубкою, через яку вичавлюється матеріал, з нанесенням його шарами для створення деталі потрібної форми (3D-друкування), одночасно потрібно автоматизувати й процес ефективного вичавлювання матеріалу з огляду на його пластичні та вибухонебезпечні властивості, й процес створення необхідного мікроклімату в зоні об'єкта для забезпечення підсихання нових шарів деталі без деформування. Отже, з огляду на це надалі необхідно розв'язати такі завдання, як:

1. Розроблення способу автоматизації процесу виготовлення елементів детонаційного двигуна з високоенергетичних матеріалів на основі технології 3D-друкування;

2. Розроблення схемних рішень та математичних моделей технологічних процесів за автоматизації процесу виготовлення елементів детонаційного двигуна з високоенергетичних матеріалів;

3. Експериментальні дослідження процесу виготовлення та верифікація теоретичних результатів, а також розроблення рекомендацій щодо використання цих результатів.

У процесі розв'язання поставлених завдань буде використано такі методи емпіричного дослідження:

- реальне спостереження за процесом виготовлення заряду в реальних умовах, вимірювання параметрів, що впливають на якість протікання процесу (тиск матеріалу у витискувачі, температура й вологість у камері, де виготовляється деталь, тощо);

- реальний експеримент щодо виготовлення деталі після синтезу та налагодження систем автоматизації;

- емпіричний опис отриманих результатів спостережень з погляду оцінювання впливу вимірюваних параметрів на якість виготовленої деталі.

Також буде використано методи теоретичного дослідження, а саме:

- узагальнення та ідеалізація під час створення математичних моделей, що описують фізичні процеси, які мають місце в разі виготовлення заряду детонаційного двигуна;

- моделювання роботи систем автоматичного керування параметрами установки для виготовлення заряду;

- синтез систем автоматичного керування параметрами установки для виготовлення заряду;

- гіпотетико-індуктивний метод під час аналізу даних експериментів з метою пошуку закономірностей у масиві зібраних даних, що дозволяють обґрунтувати та виявити нові залежності критеріїв якості виготовлення заряду від параметрів законів автоматичного керування технологічними процесами під час виготовлення заряду детонаційного двигуна.

**Висновки.** Проведений аналіз наявних рішень та їх недоліків щодо автоматизації процесу виготовлення заряду детонаційного двигуна показав, що існують рішення стосовно виготовлення компонентів ракетних двигунів за допомогою технології 3D-друкування, але для твердопаливних двигунів це завдання залишається не розв'язаним, зокрема через відсутність системного підходу, який передбачає інтеграцію елементів автоматизації в технологічне обладнання на глибокому рівні. Аналіз технологічної установки для виготовлення заряду детонаційного двигуна як об'єкта автоматизації показав, що за умови автоматизації процесу 3D-друкування заряду повинні враховуватись фізичні властивості матеріалу, що відрізняються від тих, що наразі використовуються. Насамперед це стосується процесу вичавлювання енергоємного матеріалу з оглядом на його пластичні та вибухонебезпечні властивості. Окрім того, керування 3D-друкуванням має відбуватися координовано з керуванням процесом сушіння нанесених шарів заряду для забезпечення їх швидкого підсихання без деформування.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Бондаренко М.О. Керування вектором тяги твердопаливного двигуна оперативно-тактичних ракет. *The International Scientific and Practical Conference*. 2023. URL: <https://orcid.org/0009-0008-8421-8408> (дата звернення: 06.10.2024).
2. Osorio R. NASA Validates Revolutionary Propulsion Design for Deep Space Missions. *NASA*. 2023. URL: <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/marshall/nasa-validates-revolutionary-propulsion-design-for-deep-space-missions/> (дата звернення: 06.10.2024).
3. Paur J. NASA Fires Up Rocket Engine Made of 3-D Printed Parts. *WIRED*. 2013. URL: <https://www.wired.com/2013/08/nasa-3d-printed-rocket-engine/> (дата звернення: 06.10.2024).
4. Xiaodong Yu, Hongsheng Yu, Hongwei Gao, Wei Zhang, Luigi T. DeLuca, Ruiqi Shen. 3D printed different polymer fuel grains for hybrid rocket engine. *FirePhysChem*. 2024, Volume 4. Issue 2. Pages 139–145.
5. Stepan Vasiliv, Nataliya Pryadko, Hennadii Strelnikov and Sergiy Dzuba Application of detonation in impulse systems of energy engineering and mining industry. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2023, 1156 012004. p. 1–8.

#### REFERENCES:

1. Bondarenko, M. O. (2023). Keruvannya vektorom tyahy tverdropalivnoho dvyhuna operatyvno-taktychnykh raket [Control of the thrust vector of the solid-fuel engine of operational-tactical missiles]. *Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya*. Retrieved from <https://orcid.org/0009-0008-8421-8408> (Data zvernennya: 06.10.2024) [in Ukrainian].
2. Osorio, R. (2023). NASA Validates Revolutionary Propulsion Design for Deep Space Missions. *NASA*. Retrieved from <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/marshall/nasa-validates-revolutionary-propulsion-design-for-deep-space-missions/> (Дата звернення: 06.10.2024 p.)

3. Paur, J. (2013). NASA Fires Up Rocket Engine Made of 3-D Printed Parts. *WIRED*. Retrieved from <https://www.wired.com/2013/08/nasa-3d-printed-rocket-engine/> (Дата звернення: 06.10.2024 р.).
4. Xiaodong, Yu., Hongsheng, Yu., Hongwei, Gao, Wei, Zhang, Luigi, T. DeLuca, & Ruiqi Shen. (2024). 3D printed different polymer fuel grains for hybrid rocket engine. *FirePhysChem*. Volume 4. Issue 2. Pages 139–145.
5. Stepan, Vasiliv, Nataliya, Pryadko, Hennadii, Strelnikov & Sergiy Dzuba (2023). Application of detonation in impulse systems of energy engineering and mining industry. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1156012004. p. 1–8.