

Г. О. СТРЕЛЬНИКОВ, О. Д. ІГНАТЬЄВ, Н. С. ПРЯДКО, С. С. ВАСИЛІВ

КЕРУВАННЯ ГАЗОВИМИ ПОТОКАМИ В РАКЕТНИХ ДВИГУНАХ

Інститут технічної механіки

Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, Дніпро, Україна, 49005; e-mail: tokel@ukr.net

В нових умовах застосування, зокрема для розгінних блоків ракет космічного призначення, космічних буксирів, сучасні ракетні двигунні установки найчастіше не задовольняють високим сучасним вимогам. Це змушує проводити фундаментальні дослідження процесів у ракетних двигунах у частині підвищення їх ефективності. В цьому плані відділом термогазодинаміки енергетичних установок Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України за останні 5 років були проведені дослідження керування газовими потоками в ракетних двигунах і газоструминних технологіях для підвищення їх ефективності та функціональних можливостей.

Досліджено механізми збурення потоку в соплі ракетного двигуна вприскуванням рідини і твердою перешкодою. Була вдосконалена математична модель збурення надзвукового потоку локальним вприскуванням рідини і розроблені нові рішення з підвищення швидкості виділення енергії рідини. Числове моделювання збуреної твердою перешкодою течії газу в соплі ракетного двигуна дозволило верифікувати відомі (в основному, експериментальні) результати і виявити невідомі раніше особливості збурення. Зокрема, було виявлено суттєве збільшення ефективності збурення потоку перешкодою в трансзвуковій області та уточнено деякі залежності щодо розподілу збуреного тиску на стінці сопла, що вважалися досі універсальними.

Досліджено можливості підвищення ефективності використання генераторного газу, що відбирається за турбіною рідинного ракетного двигуна. Було обґрунтовано переваги нової схеми подачі газу в надзвукову частину сопла, що забезпечує як охолодження стінки сопла генераторним газом, так і створення бічних керуючих сил.

Розроблено нову концепцію системи керування напрямком вектора тяги ракетного двигуна – комбінація механічної і газодинамічної систем. Обґрунтовано, що така система керування вектором тяги дозволяє підвищити ефективність і надійність системи керування польотом космічного ступеня ракети. Розроблено нову схему рідинного ракетного двигуна з керуванням як величиною тяги, так і напрямком вектора тяги у всіх площинах стабілізації польоту ступеня ракети.

Розроблено нові підходи до організації процесів у допоміжних елементах ракетних двигунів на базі детонаційного горіння палива, які підвищують характеристики ракетного двигуна.

Розроблено модель процесу газоструминного подрібнення сипучих матеріалів і систему автоматичного керування завантаженням млину.

Ключові слова: ракетний двигун, система керування вектором тяги, механізми збурення потоку в соплі, газодинамічна система, комбінована система керування.

1. Коваленко Н. Д., Стрельников Г. А. Некоторые тенденции развития двигателестроения в ракетно-космической технике. Материалы XII международного конгресса двигателестроителей: Авиационно-космическая техника. Харьков, 2007. № 7 (43). С. 67–71.
2. Игдалов И. М., Кучма Л. Д., Поляков Н. В., Шенгун Ю. Д. Ракета как объект управления / под ред. С. Н. Конюхова. Днепропетровск: Арт – Пресс, 2004. 544 с.
3. Коваленко Н. Д. Ракетный двигатель как исполнительный орган системы управления полетом ракет. Днепропетровск: ИТМ НАН и НКА Украины, 2003. 412 с.
4. Ferlauto M., Marsilio R. Numerical simulation of fluidic thrust-vectoring. J. Aerosp. Sci. Technol. Syst. 2016. Vol. 95, № 3. P. 153–162. <https://doi.org/10.1007/BF03404724>
5. Волков К. Н., Емельянов В. Н., Яковчук М. С. Структура течения и изменение тяги при вдуве струи газа в сверхзвуковую часть сопла. Журнал технической физики. 2019. Т. 89, № 3. С. 353–359. <https://doi.org/10.1134/S1063784219030265>
6. Kexin Wu, Kim Tae Ho; Kim Heuy Dong Theoretical and Numerical Analyses of Aerodynamic Characteristics on Shock Vector Control. Journal of Aerospace Engineering. 2020. №33(5): 04020050. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0001169](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001169)
7. Li L., Hirota M., Ouchi K., Saito T. Evaluation of Fluidic Thrust Vectoring Nozzle via Thrust Pitching Angle and Thrust Pitching Moment. Shock Waves. 2017. Vol. 27, No. 1. P. 53–61. <https://doi.org/10.1007/s00193-016-0637-0>
8. Younes K., Hickey J.-P. Fluidic thrust shock-vectoring control: a sensitivity analysis. AIAA JOURNAL. Vol. 58, №. 4. P. 1887–1900. <https://doi.org/10.2514/1.J058922>
9. Rose Biju Ben, Btn Sridhar. An experimental investigation on the use of a rectangular strut in a thruster scramjet for thrust vector control. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering. 2020. <https://doi.org/10.1177/0954410020973128>
10. Гришин Н. В., Приходько А. А. Секционирование набегающего потока при сверхзвуковом поперечном обтекании кругового цилиндра. Механіка гіроскопічних систем. Прилади та методи. 2016. № 32. С. 62–74.
11. Полевой О. Б., Приходько А. А., Липатов И. И. Математическое моделирование влияния теплообмена на отрыв сверхзвукового трехмерного потока при обтекании цилиндра, установленного на пластине. Вестник ХНТУ. 2015. № 3. С. 447–451.

12. Коваленко Т. А. Бифункциональная система управления вектором тяги жидкостного ракетного двигателя со вдувом в сопло турбинного газа. *Техническая механика*. 2016. № 3. С. 77–86.
13. Коваленко Т. О., Коваленко Г. М., Сироткіна Н. П. Рідинний ракетний двигун з турбонасосною системою подачі палива в камеру згоряння і системою газодинамічного регулювання вектора тяги: пат.111995 Україна: МПК F02K 9/00. № а 2014 10644; заявл. 29.09.2014; опубл. 11.07.2016, Бюл. № 13. 8 с.
14. Коваленко М. Д., Стрельников Г. О., Золотко О. Є., Золотко О. В., Коваленко Г. М., Сироткіна Н. П. Рідинний ракетний двигун з допалюванням відпрацьованого генераторного газу турбіни турбонасосного агрегату: Пат.112118 Україна: МПК F02 K9/00. № а 2014 13597; заявл. 18.12.2014; опубл. 25.07.2016, Бюл. № 14. 5 с.
15. Strelnykov H., Ihnatiev O., Pryadko N. The influence of the interceptor position on the thrust vector control efficiency of the rocket engine. About the problems of science and practice, tasks and ways to solve them : abstracts of VI International scientific and practical conference (Milan, Italy, October 26-30, 2020). Milan. Italy, 2020. P. 570–574.
16. Игнатьев А. Д., Коваленко М. Д., Коваленко Т. А., Прядко Н. С., Сироткина Н. П., Стрельников Г. А., Токарева Е. Л. Управление газовыми потоками в ракетном двигателе. *Технічна механіка*. 2018. № 3. С. 59–68. <https://doi.org/10.15407/itm2018.03.059>
17. Коваленко Т. А., Шептун Ю. Д., Сироткина Н. П. Система управления вектором тяги жидкостного ракетного двигателя космической ступени ракеты-носителя при возникновении массовой асимметрии. *Вестник Днепропетровского университета. Ракетно-космическая техника*. 2016. Т. 24, № 4. С. 33–44.
18. Коваленко Т. А., Коваленко Г. Н., Сироткина Н. П. Управление вектором тяги жидкостного ракетного двигателя космической ступени ракеты-носителя при возникновении массовой асимметрии. *Техническая механика*. 2016. № 1. С. 51–59.
19. Коваленко Н. Д., Токарева Е. Л. Оценка влияния жесткости конструкции камеры жидкостного ракетного двигателя на характеристики управления вектором тяги. *Техническая механика*. 2016. № 4. С. 3–13.
20. Kovalenko N. D., Sheptun U. D., Kovalenko T. A., Strelnikov G. A. The new concept of thrust vector control for rocket engine. *Системні технології*. 2016. № 6. С. 120–127.
21. Сироткина Н. П., Коваленко Н. Д., Игнатьев А. Д. О модификациях перспективной системы управления вектором тяги двигателя третьей ступени ракеты-носителя типа «Циклон-З». *Техническая механика*. 2016. № 4. С. 14–23.
22. Прядко Н. С., Сироткина Н. П., Токарева Е. Л. Повышение эффективности комбинированного управления вектором тяги ракетного двигателя. *Технічна механіка*. 2019. № 2. С. 30–38. <https://doi.org/10.15407/itm2019.02.030>
23. Коваленко М. Д., Золотко О. Є., Золотко О. В., Стрельников Г. О., Сироткіна Н. П. Спосіб глибокого регулювання тяги ракетного двигуна та ракетний двигун з глибоким регулюванням тяги: пат.110148 Україна: МПК F02K 9/44, F02K 9/86, F02K 1/17. № а 2014 04261; заявл. 22.04.2014; опубл. 25.11.2015, Бюл. № 22. 8 с.
24. Ігнат'єв О. Д., Прядко Н. С., Сироткіна Н. П., Стрельников Г. О., Токарева О. Л. Спосіб регулювання вектору тяги та рідинний ракетний двигун, який його реалізує: заявка Україна, МПК F02K 9/00. Вих. № 57/587-06 від 15.11.19. 11 с.
25. Василів С. С., Коваленко М. Д., Грушко В. О. Дослідження процесів у детонаційних ракетних двигунах. *Механіка гіроскопічних систем*. 2017. № 34. С. 44–52. <https://doi.org/10.20535/0203-3771332017119369>
26. Василів С. С., Прядко Н. С. Класифікація схем форсуночних головок ротаційного детонаційного ракетного двигуна. *Системні технології*. 2019. № 5. С. 151–158. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-124-2019-14>
27. Vasylyiv S. S., Pryadko N. S. Computer simulation of gas-dynamic processes for optimization of rocket fairing design. *Технічна механіка*. 2020. № 2. С. 36–46. <https://doi.org/10.15407/itm2020.02.036>
28. Pryadko N. S., Ternova K. V. Acoustic monitoring of jet grinding. NAS of Ukraine, Institute of Technical Mechanics of NAS of Ukraine and SSA of Ukraine. Kyiv: Akadem periodyka, 2020. 192 p. <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.409.192>
29. Музыка Л. В., Прядко Н. С., Стрельников Г. А. Управление массопотоками в замкнутом цикле измельчения. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2019. № 4. С. 5–10. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-4/3>
30. Muzyka L., Pryadko N., Strelnykov G., Ternova K., Verkhobina I. Acoustic method of jet grinding study and control. E3S Web of Conferences 109, 00074 (2019) *Essays of Mining Science and Practice*. 2019. P. 1–11. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900074>
31. ANSYS Fluent Tutorial Guide: Release 18.0. ANSYS Inc. 2017. 1034 p.

Отримано 25.05.2021,
в остаточному варіанті 08.06.2021