

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2026.01.060

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЗАПУСКУ РІДИННИХ РАКЕТНИХ ДВИГУНІВ

Чернявський О.С.¹ [ORCID], Долгополов С.І.² [ORCID], Шевченко С.А.³ [ORCID]

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, аспірант, Україна

²Інститут технічної механіки Національної академії наук України, Державного космічного агентства України, к.т.н., ст. наук. співробітник, Україна

³Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, к.т.н., Україна

Анотація. Розглянуто низку складних фізичних процесів та явищ, що супроводжують запуск рідинних ракетних двигунів (РРД). Експериментально-розрахунковим методом визначено характеристики кавітаційних течій у насосах РРД та розроблено математичну модель кавітуючих насосів. Для математичного моделювання явищ запізнення газоутворення компонентів палива та перебування продуктів згоряння у газових трактах РРД застосовано наближену заміну рівнянь із запізнюваннями звичайними диференціальними рівняннями. Для опису хвильових процесів у протяжних розгалужених гідравлічних трактах багатодвигунних установок використовується підхід, що ґрунтується на імпедансному методі і передбачає узгодження частотних характеристик гідравлічних трактів як систем з розподіленими та зосередженими параметрами. Для гідравлічної системи змінної структури розглянуто кілька конфігурацій, які реалізуються на різних етапах її роботи. Тому актуальним є розроблення математичної моделі динамічних процесів у зворотному клапані, для верифікації якої використано результати CFD-розрахунків розподілу тиску на поверхні тарілки запірного органу. Математичне моделювання запуску РРД з використанням розроблених математичних моделей дозволило уточнити характеристики перехідного процесу при запуску РРД.

Ключові слова: рідинний ракетний двигун, запуск, кавітація в насосах, запізнення газоутворення та перебування продуктів згоряння, система живлення змінної структури, розгалужений гідравлічний тракт, математичне моделювання

Запуск рідинних ракетних двигунів (РРД) включає низку різноманітних складних фізичних процесів та явищ. До них можна віднести заповнення гідравлічних трактів криогенними компонентами палива, накопичення та займання компонентів палива в газогенераторі та камері згоряння, процеси

динамічної розкрутки турбонасосного агрегату, хвильові процеси у протяжних розгалужених гідравлічних трактах багатодвигунних установок тощо. У даній роботі розглянуто математичне моделювання низки найбільш значимих динамічних процесів, які мають визначальний вплив на характеристики перехідних процесів під час запуску РРД. До них відносяться кавітаційні явища в насосах РРД; явища запізнення газоутворення компонентів палива та перебування продуктів згоряння у газогенераторі та камері згоряння; хвильові процеси у протяжних розгалужених гідравлічних трактах багатодвигунних установок; динамічні процеси під час роботи зворотних клапанів у гідравлічних системах змінної структури. Метою роботи є дослідження складних та різноманітних динамічних процесів при запуску РРД.

Кавітаційні явища у насосах РРД не тільки змінюють енергетичні характеристики насосів, але також впливають на динаміку двигуна [1]. Визначення характеристик кавітаційних течій у насосах РРД теоретичним шляхом зараз не поширено через незадовільну узгодженість результатів теоретичних і експериментальних досліджень. Тому використовуються підходи з залученням експериментальних даних. Актуальним є визначення коефіцієнтів гідродинамічної моделі кавітуючих насосів РРД на основі експериментальних частот кавітаційних коливань та границь областей існування кавітаційних автоколивань. При визначенні пружності кавітаційних каверн і від'ємного опору кавітаційних каверн були використані експериментальні частоти кавітаційних коливань у 26 насосах РРД різної розмірності і продуктивності. При визначенні коефіцієнта розподілу кавітаційного опору та кавітаційного запізнення були додатково використані границі експериментальних областей існування кавітаційних автоколивань 14 насосів. Із залученням зазначених коефіцієнтів гідродинамічної моделі розроблено математичну модель кавітуючих насосів РРД. Математичне моделювання запуску РРД з використанням цієї моделі дозволило уточнити характеристики перехідного процесу при запуску РРД.

Для математичного моделювання явищ запізнення газоутворення компонентів палива та перебування продуктів згоряння у газогенераторі та

камері згоряння використовувалася наближена заміна рівнянь із запізнюваннями математичної моделі низькочастотної динаміки газових трактів РРД звичайними диференціальними рівняннями. Для апроксимації передавальних функцій ланок запізнення запропоновані дробово-раціональні функції, побудовані з урахуванням особливостей розрахунку перехідних процесів при запуску РРД. На основі розрахунку частотних характеристик РРД з допалюванням генераторного газу та перехідних процесів при запуску РРД проведено тестування запропонованих апроксимантів. Показано, що запізнення в рівняннях динаміки газогенератора і газоводу РРД з допалюванням генераторного газу мають помітний вплив на характеристики перехідних процесів при запуску РРД, а використання запропонованих апроксимантів для урахування цих запізнювань дозволяє підвищити точність результатів математичного моделювання.

Математичне моделювання низькочастотної динаміки рідини в трубопровідних системах ґрунтується на розв'язанні диференціальних рівнянь неусталеного руху та нерозривності рідини у частинних похідних. Для опису хвильових процесів у протяжних розгалужених гідравлічних трактах багатодвигунних установок та у стендових системах використовується підхід, що ґрунтується на імпедансному методі. Він складається з двох етапів при визначенні перехідних процесів у гідравлічній системі. На першому етапі визначаються частотні характеристики гідравлічної досліджуваної системи як системи з розподіленими параметрами. Далі складається математична модель із зосередженими параметрами, коефіцієнти якої задаються таким чином, щоб частотні характеристики систем з розподіленими та зосередженими параметрами узгоджувалися із заданою точністю у певному частотному діапазоні. Математична модель із зосередженими параметрами вже безпосередньо використовується для визначення перехідних процесів у гідравлічній системі.

Для гідравлічної системи змінної структури представлений підхід вимагає уточнення. Пропонується розглянути кілька конфігурацій такої системи, які реалізуються на різних етапах її роботи [2]. Перехід від однієї конфігурації до

іншої здійснюється під час моделювання процесу запуску або за рахунок роботи системи зворотних клапанів, або примусово – шляхом програмного закриття одних і відкриття інших клапанів. В зв'язку з цим актуальним є розроблення математичної моделі динамічних процесів у зворотному клапані. Для верифікації цієї моделі використано результати CFD-розрахунків розподілу тиску на поверхні тарілки запірного органу [3]. Для визначення сили дії потоку на тарілку клапана запропоновано підхід у наближенні із зосередженими параметрами, який ґрунтується на балансі витрат робочої рідини у проточній частині клапана. Розглянуто потік у радіальному напрямку на вході клапана, який залежить від ходу тарілки, та потік на периферії запірного органу, у вузькій щілині між корпусом і тарілкою. Для реалізації цього підходу достатньо знати геометричні характеристик клапана та значення коефіцієнтів витрати, які приймаються постійними.

На основі математичного моделювання продемонстровано задовільну роботу системи живлення змінної структури тестового двигуна з допалюванням генераторного газу. Показано стабільну подачу компонентів палива в газогенератор і камеру згоряння при перемиканні живлення від пускового бачка на живлення від насоса для обраної циклограми запуску. Запропоновано конструктивні та схемні рішення для оптимізації роботи зворотних клапанів у гідравлічній системі живлення паливом змінної структури.

Висновки

Розглянуто низку складних фізичних процесів та явищ при запуску РРД. Експериментально-розрахунковим способом визначено характеристики кавітаційних течій у насосах РРД та розроблено математичну модель кавітуючих насосів РРД. Математичне моделювання запуску РРД з використанням цієї моделі дозволило уточнити характеристики перехідного процесу при запуску РРД.

Для математичного моделювання явищ запізнення газоутворення компонентів палива та перебування продуктів згоряння у газогенераторі та камері згоряння використовувалася наближена заміна рівнянь із

запізнюваннями математичної моделі низькочастотної динаміки газових трактів РРД звичайними диференціальними рівняннями. Показано, що запізнення в рівняннях динаміки газогенератора і газоводу РРД з допалюванням генераторного газу мають помітний вплив на характеристики перехідних процесів при запуску РРД, а використання запропонованих апроксимантів для урахування цих запізнювань дозволяє підвищити точність результатів математичного моделювання.

Для опису хвильових процесів у протяжних розгалужених гідравлічних трактах багатодвигунних установок та у стендових системах використовується підхід, що ґрунтується на імпедансному методі і передбачає узгодження частотних характеристик гідравлічних трактів як систем з розподіленими та зосередженими параметрами.

Для гідравлічної системи змінної структури представлений підхід вимагає уточнення. Пропонується розглянути кілька конфігурацій такої системи, які реалізуються на різних етапах її роботи. В зв'язку з цим актуальним є розроблення математичної моделі динамічних процесів у зворотному клапані. Для верифікації цієї моделі використано результати CFD-розрахунків розподілу тиску на поверхні тарілки запірного органу. На основі математичного моделювання продемонстровано задовільну роботу системи живлення змінної структури тестового двигуна з допалюванням генераторного газу.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

- 1 Dolgoplov, S. I. Generalization of Experimental Elasticity of Cavitation Bubbles in LRE Pumps that Differ Significantly in Size and Performance. *Sci. innov.* 2023. 19(5), 71–88. <https://doi.org/10.15407/scine19.05.071>
2. Dolgoplov S., Cherniavskiy O., Shevchenko S. Mathematical modeling of dynamic processes in the branched reconfigurable fuel feed system of a liquid-propellant rocket engine. *CEAS Space Journal.* 2025. p. 14. <https://doi.org/10.1007/s12567-025-00691-y>
3. Cherniavskiy O. S., Dolgoplov S. I., Shevchenko S. A. Modeling of a check valve operation in the reconfigurable hydraulic feed system of a liquid rocket engine. *Техн. мех.* 2025. № 4. С. 19–30. <https://doi.org/10.15407/itm2025.04.019>

**MATHEMATICAL MODELING OF COMPLEX DYNAMIC PROCESSES DURING
LIQUID-PROPELLANT ROCKET ENGINES START-UP**

O. Cherniavskiy, S. Dolgoplov, S. Shevchenko

Abstract. *A number of complex physical processes and phenomena occurring during the start-up of liquid-propellant rocket engines (LPREs) are considered. The characteristics of cavitating flows in LPRE pumps are determined using an experimental–computational approach, and a mathematical model of cavitating pumps is developed. For mathematical modeling of the delay in propellant gasification and the residence time of combustion products in LPRE gas paths, an approximate replacement of delay-differential equations in the dynamic model of gas paths by ordinary differential equations is employed. To describe wave processes in extended branched hydraulic lines of multi-engine systems, an approach based on the impedance method is used, which involves matching the frequency characteristics of hydraulic lines represented as distributed- and lumped-parameter systems. For a reconfigurable hydraulic system, several configurations corresponding to different stages of its operation are considered. In this regard, a mathematical model of dynamic processes in a check valve is developed, and its verification is performed using CFD simulation results of pressure distribution over the valve poppet surface. Mathematical modeling of LPRE start-up using the developed models makes it possible to refine the characteristics of the transient processes during engine start-up.*

Keywords: *liquid-propellant rocket engine, start-up, pump cavitation, propellant gasification delay, combustion product residence time, reconfigurable feed system, branched hydraulic line, mathematical modeling.*