

До 90-річчя від дня народження академіка НАН України В. В. Пилипенка

УДК 629.7:72.3

<https://doi.org/10.15407/itm2025.04.003>

С. І. ДОЛГОПОЛОВ, О. Д. НИКОЛАЄВ, Н. В. ХОРЯК

РОЗВИТОК НАУКОВИХ НАПРЯМІВ АКАДЕМІКА НАН УКРАЇНИ В. В. ПИЛИПЕНКА

*Інститут технічної механіки Національної академії наук України
і Державного космічного агентства України,
вул. Ляшко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: dolmrut@gmail.com*

У статті представлені результати досліджень з основних наукових напрямів діяльності академіка НАН України В. В. Пилипенка, отримані його учнями за останні роки. Розглянуто такі напрямки: розвиток теорії кавітаційних коливань у насосах рідинних ракетних двигунів (РРД), дослідження низькочастотної динаміки у рідинних ракетних двигунних установках (РРДУ), аналіз та забезпечення поздовжньої стійкості рідинних ракет-носіїв (РН), математичне моделювання динамічних процесів у ракетних двигунах на твердому паливі, розробка пневматичних віброзахисних модулів, удосконалення технології буріння свердловин за допомогою кавітаційного гідровібратора. Набула подальшого розвитку гідродинамічна модель кавітуючих насосів РРД: проведено її верифікацію з використанням експериментальних і теоретичних передавальних матриць кавітуючих насосів; запроваджено два нові коефіцієнти: час затримки передачі збурення за рахунок наявності кавітаційних каверн у насосі та коефіцієнт розподілу кавітаційного опору; за результатами динамічних випробувань 26 насосів РРД визначено експериментальні значення пружності кавітаційних каверн у насосах з розширеними діапазонами їх основних геометричних та режимних параметрів; розроблено механізм реалізації процесу запирання в насосах і показано, що характеристика режимів запирання насоса є специфічною нелінійністю, яка пов'язана з критичною кавітаційною течією рідини в насосі; запропоновано механізм реалізації жорстких режимів збудження кавітаційних автоколивань і проведено їх математичне моделювання. Розвинена теорія низькочастотної динаміки у РРДУ: розроблено методику визначення впливу неодночасного вступу в роботу двигунів та внутрішніх і зовнішніх факторів на розкид тяги РРД при їх запуску; проведено математичне моделювання перехідних процесів у спільній системі живлення маршового двигуна та рідинної реактивної системи верхнього ступеня РН «Циклон-4М» при запуску та зупинці маршового двигуна. Проведено дослідження поздовжніх коливань у ракетах протитипах РН «Циклон» і РН «Дніпро», які були нестійкими щодо поздовжніх коливань під час роботи двигунів першого ступеня.

Ключові слова: *рідинний ракетний двигун, кавітаційні коливання, низькочастотні динамічні процеси, поздовжні коливання рідинних ракет-носіїв, ракетний двигун на твердому паливі, пневматична віброзахисна система, буріння свердловин, кавітаційний гідровібратор.*

This paper presents the results of studies along the principal research lines of Viktor V. Pylypenko, an Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, obtained by his pupils over the recent years. The following lines are considered: the development of a theory of cavitation oscillations in liquid-propellant rocket engine (LPRE) pumps, the study of low-frequency dynamics in liquid-propellant rocket propulsion systems (LPRPSs), the analysis and assurance of liquid-propellant launch vehicle pogo stability, the mathematical simulation of dynamic processes in solid-propellant rocket engines, the development of pneumatic vibration protection modules, and the improvement of drilling technology by using cavitation hydrovibrator. A hydrodynamic model of cavitating LPRE pumps was developed further: it was verified using theoretical and experimental transfer matrices of cavitating pumps, and two new coefficients were introduced: the time of disturbance transfer delay due to the presence of cavities and the cavitation resistance distribution coefficient; from the results of dynamic tests of 26 pumps, the cavity elasticity was determined for pumps with extended ranges of their geometric parameters and operating conditions; a pump choking mechanism was developed, and it was shown that the pump choking characteristic is a specific nonlinearity involving a critical cavity flow; a mechanism of hard excitation of cavitation self-oscillations was proposed, and they were mathematically simulated. A theory of LPRPS low-frequency dynamics was developed further: procedures were developed for determining the effect of a nonsimultaneous engine startup and external and internal factors on LPRE startup thrust spread; a mathematical simulation was conducted to study sustainer engine startup and shutdown transients in the common feed system of the sustainer engine and the liquid-propellant thrust system of the Cyclone-4M launch vehicle's upper stage. A study was conducted on pogo vibrations in the prototype Cyclone and Dnipro launch vehicles unstable for pogo vibrations during the first-stage engine operation.

Keywords: liquid-propellant rocket engine, cavitation oscillations, low-frequency dynamic processes, liquid-propellant launch vehicle pogo oscillations, solid-propellant rocket engine, pneumatic vibration protection system, well drilling.

© С. І. Долгополов, О. Д. Николаєв, Н. В. Хоряк, 2025

Техн. механіка. – 2025. – № 4.

Вступ. Віктор Васильович Пилипенко – видатний учений у галузі механіки, академік НАН України, доктор технічних наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії СРСР у галузі науки і техніки, Державної премії України в галузі науки і техніки, премії НАН України ім. М. К. Янгеля.

З 1966 року творча та науково-організаційна діяльність В. В. Пилипенка була пов'язана з Національною академією наук України. Плідна робота Віктора Васильовича в галузі динаміки рідинних ракетних двигунних установок (РРДУ) і рідинних ракет-носіїв (РН) здобула йому заслужений авторитет і повагу наукової громадськості: у грудні 1979 року він був обраний членом-кореспондентом, а в квітні 1982 року – дійсним членом Академії наук УРСР.

У 1970 році В. В. Пилипенко очолив створений за його ініціативою відділ динаміки двигунних установок літальних апаратів. Цей відділ був організований після успішного впровадження на одному з підприємств міністерства загального машинобудування СРСР результатів науково-дослідних робіт з розробки засобів усунення кавітаційних коливань у системах живлення рідинних ракетних двигунів (РРД). З самого початку створення і по теперішній час у відділі розвивається запропонований Віктором Васильовичем оригінальний науковий напрямок досліджень динаміки РРДУ та поздовжньої стійкості рідинних РН з урахуванням кавітаційних явищ у шнековідцентрових насосах, розробляються як фундаментальні, так і прикладні аспекти цього важливого напрямку.

В. В. Пилипенко розробив теорію високочастотних коливань тиску рідини в гідравлічних системах з кавітуючими місцевими гідравлічними опорами. Був створений принципово новий генератор коливань тиску рідини – кавітаційний генератор коливань, який дозволяє перетворити стаціонарний потік рідини на вході в генератор в пульсуючий високочастотний потік на виході з нього. Генератор коливань не містить рухомих і обертових частин і не вимагає підведення додаткової енергії. В. В. Пилипенко є ініціатором використання кавітаційних генераторів коливань тиску рідини для створення нових перспективних, високопродуктивних, екологічно чистих технологічних процесів у різних галузях промисловості: емульгування, диспергування, очищення поверхонь, буріння свердловин [1].

Новим напрямком діяльності В. В. Пилипенка було вирішення проблеми гасіння низькочастотних коливань на транспорті. Під його керівництвом і за його безпосередньою участю розроблено нові високоефективні конструкції віброзахисних систем, які дозволяють забезпечити низьку власну частоту коливань об'єкта, що захищається. Ці конструкції віброзахисних модулів призначені для використання в системах віброзахисту космічних апаратів, підвісках об'єктів автомобільної техніки, ручному пневматичному інструменті ударної дії тощо.

В останні роки В. В. Пилипенко активно працював над створенням екологічно чистої технології підготовки та спалювання тонкодисперсного вугільного палива [1].

У статті представлені результати досліджень з основних наукових напрямів діяльності академіка НАН України В. В. Пилипенка, отримані його учнями за останні роки.

Розвиток теорії кавітаційних коливань у насосах РРД. Проведено верифікацію гідродинамічної моделі кавітуючих насосів РРД з використанням

експериментальних і теоретичних передавальних матриць кавітуючих насосів [2]. Експериментальна передавальна матриця запозичена з роботи Бреннена, Мейсснера, Ло і Хоффмана [3], яка серед представлених в літературі експериментальних передавальних матриць має найменший розкид значень. Теоретична передавальна матриця запозичена з роботи В. Пилипенка та Ю. Кваші [4], де вона отримана для кавітуючого насоса, розглянутого як систему з розподіленими параметрами. Проведено верифікацію чотирьох варіантів гідродинамічної моделі кавітуючих насосів РРД і розглянуто шість можливих коефіцієнтів моделі. Тільки один з цих коефіцієнтів – коефіцієнт інерційного опору рідини на ділянці розташування кавітаційної каверни має від'ємне значення, що суперечить його фізичному сенсу, і тому він не може використовуватися в моделі динаміки кавітуючих насосів. Результати верифікації гідродинамічної моделі кавітуючих насосів РРД показали, що модель динаміки кавітуючих насосів, яка містить чотири коефіцієнти моделі, дозволяє задовільно описати кавітаційні явища в насосах РРД в частотному діапазоні до 200 Гц. До цих коефіцієнтів належать кавітаційна пружність, кавітаційний опір, затримка передачі збурення, обумовлена наявністю кавітаційних каверн в насосі, а також постійна часу кавітаційних каверн або коефіцієнт розподілу кавітаційного опору.

За теоретичними передатними матрицями кавітуючих насосів визначені залежності від режимних параметрів таких коефіцієнтів гідродинамічної моделі кавітуючих насосів РРД: кавітаційна пружність, кавітаційний опір, час затримки передачі збурення за рахунок наявності кавітаційних каверн у насосі та коефіцієнт розподілу кавітаційного опору [5]. Два останні коефіцієнти є новими в гідродинамічній моделі кавітуючих насосів, введеними при її верифікації за експериментальними та теоретичними передатними матрицями насосів. Аналіз залежності коефіцієнта розподілу кавітаційного опору від режимних параметрів показав, що зі збільшенням числа кавітації він помітно зменшується. Це свідчить про те, що місце розташування зосередженої податливості кавітаційних каверн зміщене від середнього положення в бік входу в насос. Таким чином, припущення про те, що зосереджена кавітаційна податливість розташовується посередині приєднаної каверни і не змінює свого положення при зміні числа кавітації, не підтвердилося.

За результатами динамічних випробувань 26 насосів РРД визначено експериментальні значення пружності кавітаційних каверн у насосах з розширеними діапазонами їх основних геометричних та режимних параметрів [6]. Результати експериментальних досліджень насосів, що використовувались, були отримані різними авторами при вогневих і автономних випробуваннях на різних стендах протягом декількох десятиліть. Показано, що експериментальні значення пружності кавітаційних каверн для насосів різного призначення, розмірів та продуктивності загалом задовільно узгоджуються між собою. Слід зазначити також узгодження експериментальних даних щодо бустерних низьконапірних насосів з даними щодо високонапірних шнековідцентрових насосів, насосів з постійною і змінною геометрією на вході в насос, насосів з двома і трьома лопатками, насосів з осьовими, боковими, кільцевими та двосторонніми підводами рідини. Проведено апроксимацію відносної пружності кавітаційних каверн від числа кавітації та коефіцієнта витрати за формулою, яка дозволяє описати кавітаційні явища в насосах у всьому діапазоні існування кавітаційних каверн. Уточнено залежності числа

початкової кавітації від коефіцієнта витрати насосів РРД з високими антикавітаційними якостями. Описано три види відхилень експериментальних частот коливань від власних частот коливань рідини в гідравлічній системі з кавітуючим насосом. Перший і другий види відхилень обумовлені взаємодією рідини та конструкції живильного трубопроводу. При першому виді відхилень експериментальна частота коливань різко відхиляється вгору від власної частоти коливань, при другому – набуває постійного значення. Третій вид відхилень обумовлений розвиненими кавітаційними автоколиваннями, коли частота коливального процесу може знижуватися більш ніж у 2 рази відносно власної частоти коливань рідини.

Визначено коефіцієнти гідродинамічної моделі кавітуючих насосів РРД у всій області існування кавітаційних каверн на основі експериментальних частот кавітаційних коливань та границь областей існування кавітаційних автоколивань [7]. 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 часу передачі збурення за рахунок кавітаційних каверн були додатково використані границі експериментальних областей існування кавітаційних автоколивань 14 насосів. Для більш рівномірного розшарування залежностей опору кавітаційних каверн в діапазоні великих значень коефіцієнта витрати проведено уточнення чисел початкової кавітації в насосах. Використовуючи якісний вид залежності коефіцієнта розподілу кавітаційного опору від режимних параметрів, отриманої з теоретичних передавальних матриць кавітуючих насосів, оцінку цього коефіцієнта знизу (при нульових значеннях часу передачі збурень) і оцінку зверху (по рівномірному розшаруванню детермінантів передавальних матриць насосів), було побудовано цю залежність в аналітичному вигляді. Використовуючи її, а також співвідношення коефіцієнтів математичної моделі кавітаційних коливань на границі існування кавітаційних автоколивань, були визначені та апроксимовані значення часів передачі збурень.

При дослідженні кавітаційних течій рідини в нерухомих каналах (трубці Вентурі) було встановлено, що при зниженні тиску на виході з каналу настає такий момент, коли витрата перестає збільшуватися. Для збільшення витрати необхідно підвищити тиск на вході. Це явище обмеження витрати рідини при фіксованому тиску на вході зумовлено критичним режимом кавітаційної течії в найбільш вузькому місці і отримало назву запирання. Для лопатних насосів також відомі режими запирання, які описуються так званою характеристикою режимів запирання, що зв'язує критичні значення витрати через насос з вхідним тиском. Розроблено механізм реалізації процесу запирання в насосах [8]. Він полягає в такому. Коли амплітуди коливань параметрів досить великі, то на i -му кроці інтегрування значення вхідних витрати і тиску можуть виявитися в недоступній області значень – нижче характеристики режимів запирання. У цьому випадку значення параметрів витрати і тиску мають бути уточнені. Встановлено, що розрахункова величина зниження частоти кавітаційних автоколивань по відношенню до власної частоти коливань гідравлічної системи з кавітуючим насосом є близькою до експериментальної в тому випадку, коли точка обмеження вхідних витрати і тиску за характеристикою режимів запирання знаходиться на перетині прямої, що з'єднує чисельні значення витрати і тиску на вході в насос на $(i-1)$ -му та i -му кроках інте-

грування, і характеристики режимів запирання. Показано, що характеристика режимів запирання насоса є специфічною нелінійністю, яка пов'язана з критичною кавітаційною течією рідини в насосі і може проявитися при великих розмахах коливань параметрів. Встановлено, що характеристика режимів запирання в насосах РРД при реалізації режимів запирання має більший вплив на параметри кавітаційних коливань, ніж залежність об'єму кавітаційних каверн від тиску і витрати на вході в насос, і є визначальною нелінійністю в насосній системі на зазначених режимах.

Запропоновано механізм реалізації жорстких режимів збудження кавітаційних автоколивань в системі живлення РРД [9]. Відомо, що режими жорстких збуджень кавітаційних автоколивань можуть реалізовуватися в тих випадках, коли насосна система живлення розташовується поблизу границі області існування кавітаційних автоколивань. В цьому випадку амплітуди автоколивань є невеликими, і в їх обмеженні бере участь тільки одна нелінійність (залежність об'єму кавітаційних каверн від тиску і витрати на вході в насос). При збудженні достатньої інтенсивності в насосній системі вхідні значення тиску і витрати потрапляють на характеристику режимів запирання, можуть реалізуватися режим запирання і встановитися розвинені кавітаційні автоколивання, які з перебігом часу (після зняття збурення) зберігають вигляд розривних коливань і не переходять у початкові коливання малої амплітуди. Проведено математичне моделювання жорстких режимів збудження кавітаційних автоколивань і визначені параметри цих автоколивань у стендовій системі живлення тестового насоса. Результати розрахунків показали, що в насосній системі у разі відсутності зовнішнього збурення спостерігаються автоколивання невеликої амплітуди. Після дії зовнішнього збурення в системі встановлюються розвинені (розривні) кавітаційні автоколивання, як і в експерименті. За допомогою розробленої математичної моделі жорстких режимів збудження кавітаційних автоколивань в системі живлення РРД вдалося виконати моделювання випадку, зареєстрованого в ході проведення експерименту, коли за рахунок зовнішнього збурення вдалося усунути розвинені (розривні) кавітаційні автоколивання (див. рис. 1).

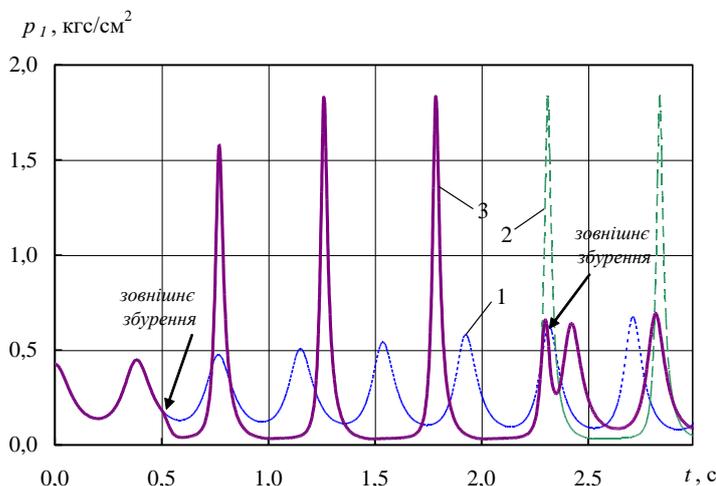
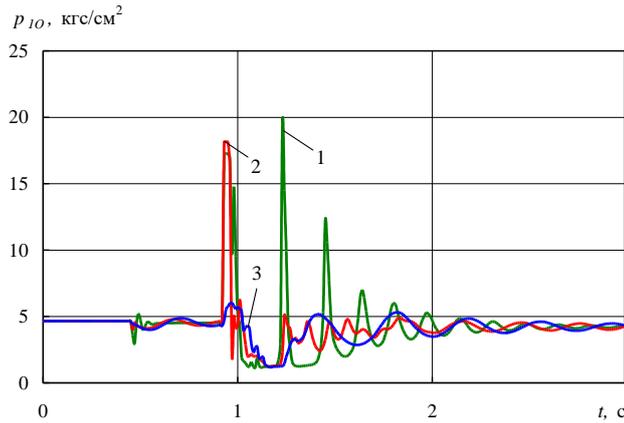


Рис. 1 – Розрахункові залежності тиску на вході в насос від часу при жорсткому режимі збудження кавітаційних автоколивань: 1 – без зовнішніх збурень; 2 – одне зовнішнє збурення при $t = 0,5$ с; 3 – зовнішні збурення при $t = 0,5$ с і $t = 2,27$ с

2. Дослідження низькочастотної динаміки у РРДУ. Проведено дослідження динамічних процесів при запуску багатодвигунної РРДУ, яка складається з чотирьох РРД із допалюванням окислювального генераторного газу, з урахуванням можливості їхнього неодновременного вступу в роботу [10, 11]. Показано, що на відміну від випадку, коли всі двигуни двигунної установки вступають в роботу одночасно, при наявності зміщень моменту початку запуску двигунів є можливими глибокі затяжні провали витрати палива на вході в двигуни, які супроводжуються глибокими затяжними провалами тиску на вході в двигуни. Ці явища здатні викликати кавітаційний зрив одного або декількох насосів, що може порушити роботу всієї двигунної установки і призвести до аварійної ситуації. Результати математичного моделювання запуску багатодвигунної РРДУ показали, що характер і ступінь впливу зміщення початку запуску двигунів РРДУ на перехідні процеси залежить від безлічі факторів, які визначаються складом РРДУ, її динамічними характеристиками, умовами запуску та ін. Тому для підвищення надійності запуску багатодвигунних РРДУ необхідно в кожному конкретному випадку – для кожної нової або модернізованої РРДУ чи ракети-носія – проводити числові дослідження перехідних процесів при запуску з урахуванням різночасності вступу двигунів в роботу.

Проведено дослідження запуску багатодвигунної РРДУ I ступеня РН «Циклон-4М», що включає чотири маршових РРД РД-870, з урахуванням встановлення демпферів поздовжніх коливань і неодновременного запуску РРД [12]. Показано суттєвий вплив кавітації в насосах двигунів і демпферів поздовжніх коливань на частотні характеристики системи живлення окислювачем РРДУ. На основі розробленої математичної моделі запуску РРДУ досліджено динамічні процеси при запуску багатодвигунної РРДУ I ступеня РН «Циклон-4М» з урахуванням неодновременного запуску окремих РРД і встановлення демпферів поздовжніх коливань в різних локалізаціях – у відгалуженнях на РРД РД-870 біля колектора (штатне розміщення) і на вході у двигуни. Аналіз перехідних процесів у системі живлення окислювачем розглянутої РРДУ, залежностей витрати і тиску на вході у двигун від часу виявив низку особливостей. По-перше, встановлення демпферів поздовжніх коливань біля колектора дозволяє при одночасному запуску двигунів усунути на вході у двигун майже всі закидання тиску, які мали місце в РРДУ, не оснащеної демпферами поздовжніх коливань. При встановленні демпферів на вході у двигуни закидання тиску на вході у двигун практично відсутні (див. рис. 2). По-друге, при розташуванні демпферів біля колектора неодновременність вступу в роботу РРД РД-870 негативно відбивається на залежностях витрати і тиску на вході у двигун від часу: для деяких варіантів зміщення моментів початку запуску двигунів спостерігається аномально велике падіння витрати окислювача і закидання тиску на вході у двигуни. Неодновременність запуску двигунів РД-870 при встановленні демпферів на вході у двигуни істотно не змінює перехідні процеси при запуску РРДУ в порівнянні з випадком одночасного запуску двигунів. По-третє, встановлення демпферів поздовжніх коливань як на вході у двигуни, так і у відгалуженнях на РРД РД-870 біля колектора має суттєвий позитивний вплив на якість перехідних процесів при запуску РРДУ I ступеня РН «Циклон-4М». Розміщення демпферів поздовжніх коливань на вході у двигуни не є штатним і розглядається без прив'язки до компонування РРДУ. Разом з тим демпфери, встановлені на вході у двигуни, є дієвим засо-

бом усунення закидання і провалів параметрів РРДУ, зокрема, в умовах неодноразового запуску РРД у складі багатодвигунної установки.



1 – без демпфера POGO; 2 – з демпфером POGO біля колектора (стандартне розташування); 3 – з демпфером POGO на вході в двигун

Рис. 2 – Зміна тиску окислювача на вході в двигун при запуску

Розроблено методику визначення впливу внутрішніх та зовнішніх факторів на розкид тяги РРД при його запуску [13]. Вона містить розробку математичної моделі запуску двигуна, в якій враховано найбільшу кількість внутрішніх факторів; визначення внутрішніх факторів, які надають найбільший вплив на розкид тяги РРД при його запуску; обрання методу завдання розкиду зовнішніх і внутрішніх факторів; проведення розрахунків запуску двигуна при різних поєднаннях розкиду зовнішніх і внутрішніх факторів і визначення розкиду тяги двигуна; визначення статистичних і теоретичних розподілів розкиду часу набору 90 % тяги двигуна і розкиду тяги двигуна на усталеному режимі і оцінка їх узгодженості за допомогою критерію згоди χ^2 Пірсона. Надано приклад розрахунку впливу розкиду зовнішніх і внутрішніх факторів на розкид тяги РРД при його запуску. За результатами попередніх розрахунків запуску двигуна визначено 12 внутрішніх факторів, які надають найбільший вплив на розкид тяги двигуна при його запуску. Показано, що розрахунковий розкид часу набору 90 % тяги (тиску в камері згоряння) складає в даному випадку від $-0,0822$ с до $+0,0730$ с. При цьому розрахунковий розкид тяги двигуна (тиску в камері згоряння) на усталеному режимі знаходиться в діапазоні від $-6,4$ % до $+6,6$ % від номінальної тяги двигуна. Отримано оцінку узгодженості отриманих статистичних і передбачуваних теоретичних розподілів розкиду часу набору 90 % тяги двигуна і розкиду тяги двигуна на усталеному режимі за допомогою критерію згоди.

Розвинуто методичний підхід до визначення розкиду тяги РРДУ, що складається зі зв'язки двох і більше двигунів [14]. Для багатодвигунної установки цей методичний підхід додатково передбачає розробку математичної моделі взаємодії двигунів у складі РРДУ, а також проведення розрахунків запуску РРДУ при різних поєднаннях розкиду зовнішніх і внутрішніх факторів у випадках, коли розкиди параметрів у всіх двигунів як однакові, так і різні. Для РРДУ, до складу якої входять два двигуни з загальним трубопро-

водом живлення окислювача, надано приклад розрахунку впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на розкид тяги Σ кожного з двигунів, так і РРДУ в цілому при запуску цієї двигунної установки. Визначено граничні відхилення розрахункових розкидів часу набору 90 % тяги і розкидів тяги для всієї двигунної установки. Вони виявилися значно (приблизно на 40 %) меншими, ніж у окремих двигунів: розкиди часу знаходяться в інтервалі $(-0,0733 \text{ с}, +0,0457 \text{ с})$, розкиди тяги – в інтервалі $(-4,8 \%, +4,8 \%)$.

Проведено розрахункове визначення розкиду тяги при запуску багатодвигунної установки РД-874 I ступеня РН «Циклон-4М», який обумовлено впливом внутрішніх і зовнішніх факторів на перехідні процеси в системах чотирьох окремих двигунів РД-870 та їх динамічною взаємодією [15]. Визначено перехідні процеси в багатодвигунній установці РД-874 при різних поєднаннях розкидів зовнішніх і внутрішніх факторів, побудовано нижню та верхню огинаючі криві залежностей тиску в камері згоряння від часу для кожного РРД у складі багатодвигунної установки. Розкид часу набору 90 % тяги та набору тяги для багатодвигунної установки РД-874 в цілому є суттєво (приблизно в 2 рази) меншим, ніж для кожного двигуна РД-870 у складі цієї установки.

Розвинуто підхід до оцінки працездатності системи живлення РРДУ космічних ступенів РН в умовах мікрогравітації на ділянках активного та пасивного польоту, а також при багаторазових запусках-зупинках маршових двигунів, зокрема у періоди з мінімальними рівнями заповнення баків [16]. В рамках розвинутого підходу на основі математичного моделювання динамічних процесів у системі живлення маршового РРД для активної та пасивної ділянки польоту космічного ступеня визначаються параметри руху і форми вільної поверхні компонентів палива у баку (див. рис. 3), параметри вільних газових

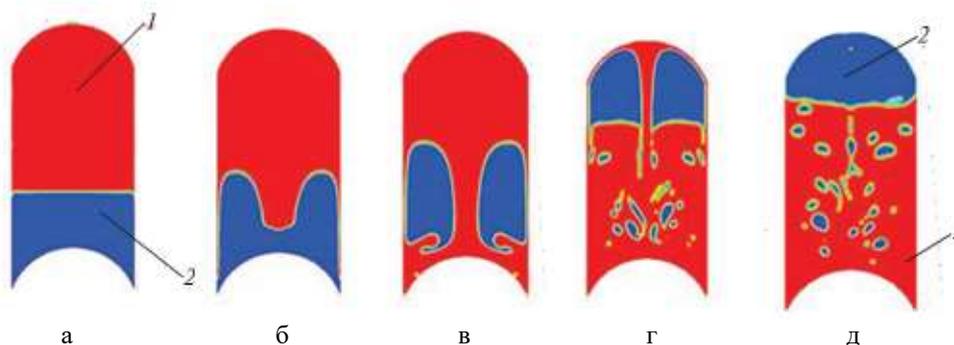


Рис. 3 – Результати чисельного моделювання меж середовищ «газ–рідина» в баку (1 – рідина, 2 – газ): а – д – фази переміщення палива

включень, що формуються, ефективність внутрішньобакових пристроїв забезпечення суцільності компонентів палива при «штатному» функціонуванні двигунної установки космічного ступеня, параметри перехідних процесів у системі живлення маршового рідинного ракетного двигуна при його запуску-зупинці, розрахункові амплітуди і частоти коливань системи живлення космічного ступеня. Отримані в результаті моделювання значення параметрів руху рідини і границі розділу середовищ «газ–рідина» узгоджуються з експериментальними даними, отриманими в умовах руху експериментального зразка паливного бака космічного ступеня «Centaur» в «кидальній вежі». Показано, що параметри перехідних процесів в системі живлення маршового

РРД космічного ступеня задовільно узгоджуються з експериментальними даними «холодних» тестових випробувань системи живлення РРД на воді.

Для умов пасивної ділянки польоту космічного ступеня РН виконано математичне моделювання просторового руху рідкого палива і вільних газових включень, що формуються, на основі якого визначено параметри руху і форми вільної поверхні рідини в баку, місце розташування газових включень [17–19]. Щодо умов руху експериментального зразка паливного бака з рідиною в «кидковій вежі» ДП «КБ «Південне», призначеної для вивчення об'єктів космічної техніки в умовах мікрогравітації, виконано чисельне моделювання руху рідини у баку сфероподібної форми. Отримані в результаті математичного моделювання значення параметрів руху рідини та границі поділу середовищ «газ–рідина» задовільно узгоджуються з отриманими експериментальними даними.

Проведено математичне моделювання перехідних процесів у спільній системі живлення маршового двигуна та рідинної реактивної системи верхнього ступеня РН «Циклон-4М» при запуску та зупинці маршового двигуна [20]. При розробці математичної моделі системи живлення двигунної установки були використані частотні характеристики живильних магістралей як систем із розподіленими та зосередженими параметрами, узгоджені у визначеному частотному діапазоні. Проведено розрахунки запуску та зупинки маршового двигуна. Показано задовільне узгодження експериментальних та розрахункових значень власних частот коливань рідини, піків тиску при гідравлічних ударах і особливостей гідравлічного удару (горизонтальні полиці тиску при розриві суцільності рідини, див. рис. 4).

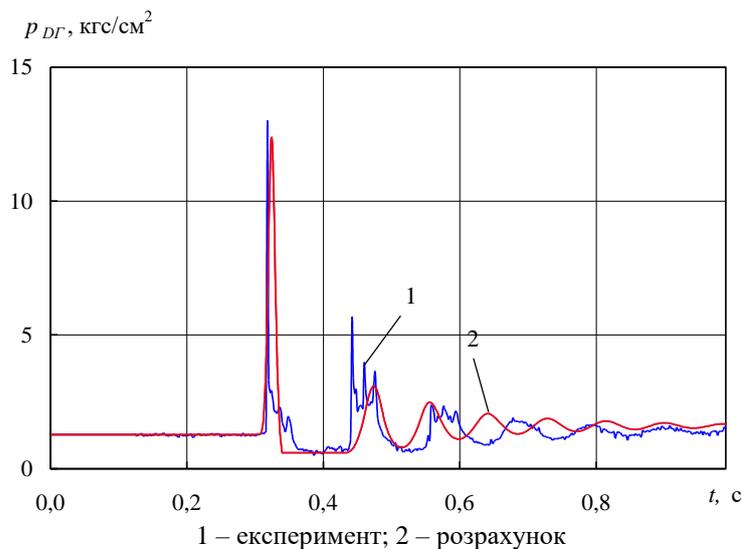


Рис. 4 – Залежності тиску пального на вході в рідинну реактивну систему від часу при зупинці маршового двигуна РД861К в стендових умовах

3. Аналіз та забезпечення поздовжньої стійкості рідинних РН. Виконано математичне моделювання вільних поздовжніх коливань корпусу РН пакетної схеми компонування з використанням комп'ютерних засобів скінченно-елементного проектування (САЕ– системи) [21]. Вперше моделювання поздовжніх коливань корпусу РН пакетної схеми проведено з урахуванням

дисипації енергії коливань рідкого палива і конструкції РН. Запропоновано підхід до аналізу поздовжньої стійкості рідинних РН пакетної схеми, в якому використовується критерій Найквіста, узагальнений для випадку багатовимірних динамічних систем.

Для прогнозування поздовжньої стійкості проекрованої двоступеневої РН «Циклон-4М» розроблено математичну модель низькочастотної динаміки системи «РРДУ – корпус РН» [22]. Розроблена модель містить математичне описання низькочастотної динаміки маршової двигунної установки РД-874 (до її складу входять чотири двигуни РД-870 з допалюванням окислювального генераторного газу), живильних магістралей та корпусу РН. В результаті теоретичного аналізу поздовжньої стійкості РН виявлено, що на початковому інтервалі часу польоту ракети (5 с, 70 с) динамічна система «РРДУ – корпус РН» є нестійкою по відношенню до I-ї поздовжньої моди корпусу РН. Для забезпечення поздовжньої стійкості РН «Циклон-4М» запропоновано встановити в живильні магістралі окислювача демпфери поздовжніх коливань. Запропоновано підхід до визначення параметрів системи демпфування РОГО-коливань, згідно з яким раціональний вибір конструктивних параметрів демпфера поздовжніх коливань здійснюється, виходячи з умови амплітудної стабілізації динамічної системи «РРДУ з демпфером поздовжніх коливань – корпус РН».

На основі скінченно-елементної дискретизації автоколивальної системи «РРДУ – корпус РН» розвинено підхід до визначення параметрів автоколивань рідинної РН при її поздовжній нестійкості (РОГО) [23]. Проведено чисельне моделювання РОГО-автоколивань двоступеневої РН. Для розрахункового випадку резонансної взаємодії корпусу РН із РРДУ визначено параметри граничного циклу динамічної системи «РРДУ – корпус РН».

В рамках моделі в'язкого тертя, що використовується при математичному описанні коливального руху пружного корпусу рідинних РН, проаналізовано та узагальнено експериментальні значення коефіцієнтів демпфування коливань рідкого палива в баках РН, коефіцієнтів демпфування коливань несучих конструкцій РН і конструктивно подібних моделей рідинних ракет, зібрані з різних джерел науково-технічної інформації [24]. Зокрема, наведено результати аналізу динамічних випробувань рідинних ракет та їх конструктивно подібних моделей: фізичної моделі в масштабі 1: 6,5 корпусу РН “Зеніт”, ракети 15A15 і її фізичної моделі, виконаної в масштабі 1: 3,7, фізичної моделі в масштабі 1: 5 ракети-прототипу РН “Дніпро” та її нижчих ступенів.

Проведено дослідження поздовжніх коливань у ракетах-прототипах РН «Циклон» і РН «Дніпро», які як динамічні системи були нестійкими щодо поздовжніх коливань під час роботи двигунів першого ступеня [25]. Розглянуто нелінійні функції, що призводять до обмеження амплітуд поздовжніх коливань, які відображають фізичні процеси кавітації в насосах та дисипації енергії коливань у конструкції ракети. Результати математичного моделювання поздовжніх коливань розглянутих РН показують, що поздовжня нестійкість може виникати як у випадку збігу власної частоти коливань конструкції ракети та частоти коливань рідкого палива в двигунній установці, так і у випадку, якщо ці частоти помітно віддалені одна від одної. У першому випадку обмеження амплітуд поздовжніх коливань відбувається через змен-

шення резонансної взаємодії рідкого палива в живильних лініях двигунної установки та конструкції ракети зі збільшенням амплітуди поздовжніх коливань. Це відбувається за рахунок нелінійної залежності пружності кавітації у насосі від параметрів режиму двигуна. Обмеження амплітуд поздовжніх коливань у другому випадку відбувається через збільшення дисипації коливальної енергії конструкції ракети-носія (див. рис. 5).

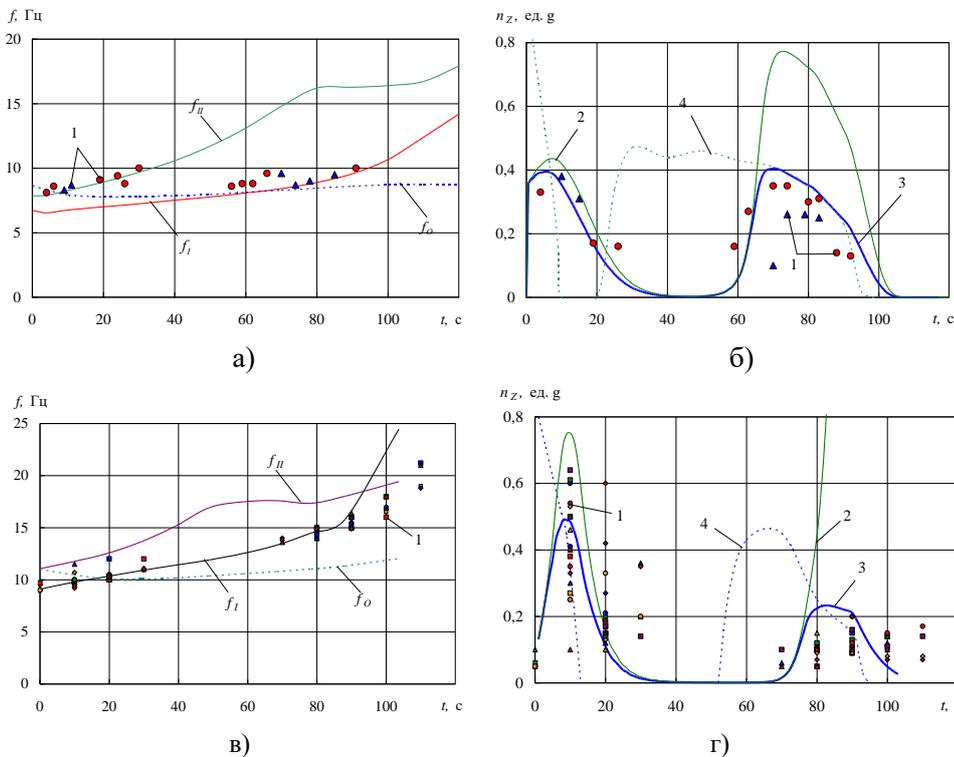


Рис. 5 – Залежності власної частоти окислювача f_O та частот коливань конструкції ракети f_I , f_{II} від часу польоту РН «Циклон» (а) і РН «Дніпро» (в); залежності амплітуд поздовжніх коливань від часу польоту РН «Циклон» (б) і РН «Дніпро» (г): 1 – дані польоту; 2 – розрахунок за нестационарною моделлю POGO з постійними декрементами коливань конструкції; 3 – розрахунок за нестационарною моделлю POGO з урахуванням залежності декрементів коливань від амплітуди коливань; 4 – розрахунок за моделлю POGO із замороженими коефіцієнтами

Розроблено методику визначення розкиду амплітуд поздовжніх коливань рідинних ракет-носіїв на прикладі РН «Дніпро», викликаного розкидом внутрішніх факторів [26]. Моделювання динамічних процесів у зв'язці із чотирьох рідинних ракетних двигунів, виконаних за схемою з допалюванням генераторного газу, проведено з урахуванням кавітаційних явищ у насосах двигунів та запізнювань у вогневих порожнинах газогенераторів. Розроблено метод визначення розкиду амплітуд поздовжніх коливань рідинних РН, зумовленого дією внутрішніх факторів, який базується на використанні рівномірно розподілених LP τ -послідовностей. За результатами розрахунків визначено залежність амплітуд поздовжніх коливань розглянутої РН у двох областях нестійкості та побудовано нижню і верхню обвідну криві для амплітуд поздовжніх коливань. Проаналізовано варіанти поєднань розкидів внутрішніх факторів, за яких було отримано найбільші та найменші значення амплітуд поздовжніх коливань. Це дозволило визначити внутрішні фактори, розкид яких

найбільше впливає на розкид амплітуд поздовжніх коливань: частота, декремент, коефіцієнти форми коливань живильного трубопроводу окислювача і у перерізі корисного навантаження на I тоні поздовжніх коливань корпусу РН.

4. Математичне моделювання динамічних процесів у ракетних двигунах на твердому паливі (РДТП). Динамічні процеси в камері згоряння РДТП розвиваються зі складним взаємозв'язком великої кількості фізико-хімічних процесів, які відбуваються в газодинамічній частині робочого простору камери двигуна і часто ведуть до встановлення автоколивальних режимів роботи двигуна. Проведено дослідження впливу шорсткості внутрішньої поверхні камери РДТП на параметри низькочастотних автоколивань робочих параметрів РДТП, що виконувалося з використанням сучасних засобів комп'ютерного моделювання та аналізу [27, 28]. Отримано режим течії з автоколиваннями, зумовленими вихороутворенням продуктів згоряння в порожнині камери та наявністю акустичного зворотного зв'язку, який виникає внаслідок зіткнення вихорів з елементами камери або соплом РДТП. Показано, що урахування шорсткості обумовило збільшення вихороутворення газу у зоні динамічної взаємодії газового та твердого середовищ і призвело до збільшення розмахів коливань тиску газу в камері (в середньому в 2,5 рази при максимальній висоті нерівностей поверхні у 56 мкм).

Розроблено підхід до математичного моделювання динамічних процесів у ракетному двигуні твердого палива без залучення традиційних різницевої схем [29]. Розроблено нелінійну математичну модель робочих процесів у РДТП у рамках одномірної течії робочого тіла та з урахуванням взаємодії з конструкцією РДТП. Завдяки заміні просторових похідних різницевоїми співвідношеннями, система диференціальних рівнянь у частинних похідних була перетворена на систему звичайних диференціальних рівнянь. Запропонований підхід було верифіковано на модельному РДТП.

Розроблено підхід до вирішення задач динаміки твердопаливної двигунної системи – оцінки впливу акустичних коливань продуктів згоряння в камері згоряння на динамічні (акустичні) процеси в камері з урахуванням їх взаємодії з конструкцією двигунної системи, демпфуванням коливань палива та структурних коливань [30]. Чисельно досліджено динамічну взаємодію робочого процесу в твердопаливних двигунних системах з просторовими коливаннями конструкції камери. Показано, що динамічний зв'язок між коливаннями конструкції та акустичними коливаннями в об'ємі продуктів згоряння слід враховувати при дослідженні міцності двигунних систем.

Розглянуто використання палива з місячного реголіту у РДТТ [31]. Представлені чисельно знайдені термодинамічні характеристики двигунної системи, що використовує металізоване паливо, близьке за характеристиками до речовин, отриманих з місячного реголіту, та результати попереднього аналізу розрахункових параметрів акустичних коливань (тяга, динамічні складові тиску та осьова швидкість) і показано розвиток вихороутворення в потоці продуктів згоряння.

5. Розробка пневматичних віброзахисних модулів. Віброзахисні системи широко застосовуються для захисту об'єктів від динамічних впливів. Найбільш ефективними з них є пневматичні віброзахисні системи, у яких для забезпечення наднизьких власних частот коливань об'єкта, що захищається, усунуто основне протиріччя, властиве всім механічним (з металевими пруж-

ними елементами) віброзахисним системам, між несучою здатністю й жорсткістю пружного елемента. При використанні пневматичного пружного елемента можна забезпечити як завгодно малу (квазінульову) жорсткість на робочій ділянці статичної характеристики із прогресивним наростанням жорсткості при ході стиснення й відбою. Ґрунтуючись на цих принципах, запропоновано нову високоефективну систему віброзахисту об'єктів ракетно-космічної техніки й інших важких об'єктів машинобудування при їхньому транспортуванні залізничним, морським і автомобільним транспортом [32]. Показано, що шляхом вибору конструкції й конструктивних параметрів можна забезпечити необхідні динамічні властивості віброзахисної системи, які характеризуються наднизькою власною частотою об'єкта, що захищається (менше 0,5 Гц), і необхідним коефіцієнтом демпфірування коливань. Розроблено і виготовлено прототип запропонованої віброзахисної системи, проведено його динамічні випробування й підтверджено високу ефективність віброзахисної системи при гасінні ударних і гармонійних збурень (див. рис. 6).

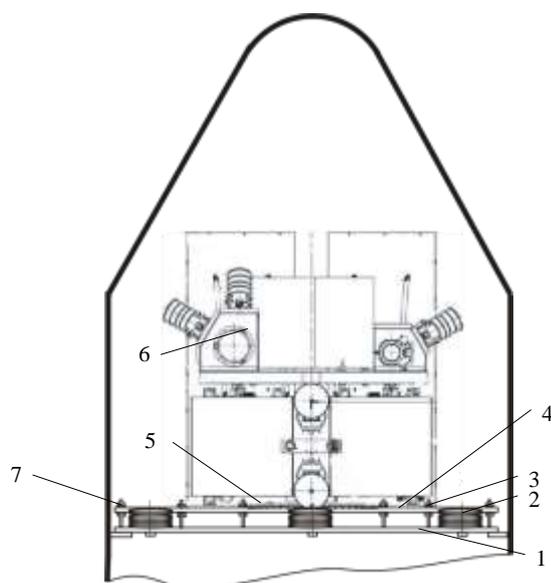


Рис. 6 – Конструктивно-компонувальна схема пневматичної системи віброзахисту космічного апарата: 1 – опорне кільце; 2 – пружно-дисипативні елементи; 3 – напрямні стрижні; 4 – основа; 5 – адаптер; 6 – космічний апарат; 7 – замок фіксації основи

Розроблено підхід до прогнозування динамічного навантаження космічних апаратів, що виводяться на робочі орбіти за допомогою РН різних компоновальних схем [33]. Підхід включає математичне моделювання просторових коливань конструкції ракети-носія відповідно до її конструктивно-компоновальної схеми, попереднє експериментальне визначення спектральної щільності потужності конструкції ракетного двигуна. Працездатність запропонованого підходу до прогнозування динамічного навантаження космічних апаратів продемонстрована на прикладі розрахункового аналізу спектральних щільностей коливань конструкцій космічних апаратів, що виводяться ракетами-носіями з різними конструктивно-компоновальними схемами.

Запропоновано нову пневматичну систему захисту космічного апарата «Січ-2М» від поздовжніх вібраційних навантажень при його виведенні на робочі орбіти. Виконано математичне моделювання низькочастотної динаміки системи віброзахисту з космічним апаратом при дії зовнішньої поздовжньої збурюючої сили гармонійного характеру. Показано, що установка такої віброзахисної системи між верхнім ступенем ракети-носія і космічним апаратом забезпечує зниження рівня поздовжніх вібраційних навантажень на космічний апарат «Січ-2М» більш ніж в два рази.

Розроблено конструкцію віброзахисної системи для крісла машиніста локомотива для захисту від ударних і знакозмінних навантажень, що виникають при русі локомотива. Виготовлено дослідний зразок крісла машиніста локомотива, проведено його статичні і динамічні випробування. Встановлено, що віброзахисна система забезпечує квазінульову жорсткість на середній ділянці статичної характеристики, власну частоту коливань захищеного об'єкта (машиніста) менш, ніж 0,6 Гц, і значення коефіцієнта посилення коливань не більше, ніж 1,2.

6. Удосконалення технології буріння свердловин за допомогою кавітаційного гідровібратора. Кавітаційний гідровібратор є одним із перспективних пристроїв для інтенсифікації буріння геологорозвідувальних та експлуатаційних свердловин. Кавітаційний гідровібратор перетворює стаціонарний потік бурового розчину на дискретно-імпульсний потік підвищеної потужності. Коливальний потік розчину в гідровібраторі перетворюється на високочастотні (1000 Гц – 20 000 Гц) коливання бурового долота. Розроблено метод визначення поздовжніх коливань бурильної колони з долотом [34]. Метод базується на результатах експериментальних досліджень динамічної взаємодії поздовжніх коливань бурильної колони з гірським масивом шляхом математичного моделювання цього процесу з використанням скінченно-елементної дискретизації бурильної колони. Отримана задовільна збіжність обчислених віброприскорень бурового долота та експериментальних даних.

В математичній моделі поздовжніх коливань бурового снаряда проведено урахування контакту бурового інструмента з породою, що руйнується, і сил, що діють в осьовому напрямку на конструкцію бурового снаряда [35]. Значущість отриманих результатів у тому, що математична модель системи «буровий снаряд – гірська порода» дозволяє на стадії проектування встановити раціональний режим роботи кавітаційного гідровібратора для реалізації прийнятних рівнів віброприскорень на породоруйнівному інструменті.

Розроблено методику оцінки гідравлічної енергоефективності бурового снаряда на підставі математичної моделі системи «буровий снаряд з гідровібратором – гірська порода» з урахуванням впливу амплітуди коливань елемента на дисипативні втрати [36]. Методика заснована на експериментальному й теоретичному дослідженні динамічних параметрів бурового снаряда та ефективності перетворення стаціонарної течії рідини в пульсуючий потік.

Висновки. У статті представлені результати досліджень з основних наукових напрямів діяльності академіка НАН України В. В. Пилипенка, отримані його учнями за останні роки. Розглянуто такі напрямки: розвиток теорії кавітаційних коливань у насосах рідинних ракетних двигунів, дослідження низькочастотної динаміки у рідинних ракетних двигунних установках, аналіз

та забезпечення поздовжньої стійкості рідинних ракет-носіїв, математичне моделювання динамічних процесів у ракетних двигунах на твердому паливі, розробка пневматичних віброзахисних модулів, удосконалення технології буріння свердловин за допомогою кавітаційного гідровібратора.

1. Пилипенко О. В., Довгоцько Н. И. Виктор Васильевич Пилипенко – выдающийся ученый в области механики. Техн. механика. 2015. № 4. С. 3–22.
2. Долгополов С. I. Верифікація гідродинамічної моделі кавітуючих насосів РРД за теоретичними та експериментальними передавальними матрицями насосів. Техн. механіка. 2020. № 3. С. 18–28. <https://doi.org/10.15407/itm2020.03.018>
3. Бреннен, Мейсснер, Ло, Хоффман Проявление масштабных эффектов в динамических передаточных функциях кавитирующих преднасосов. Тр. амер. о-ва инж. мех. Теоретические основы инженерных расчетов. 1982. 104, № 4. С. 428–433. <https://doi.org/10.1115/1.3241875>
4. Пилипенко В. В., Кваша Ю. А. Устойчивость кавитационного обтекания решетки пластин. Техн. механика. 2001. № 2. С. 144–149.
5. Долгополов С. I. Визначення коефіцієнтів гідродинамічної моделі кавітуючих насосів рідинних ракетних двигунів за їх теоретичними передатними матрицями. Техн. механіка. 2024. № 1. С. 16–25. <https://doi.org/10.15407/itm2024.01.016>
6. Dolgoplov S. I. Generalization of experimental elasticity of cavitation bubbles in LRE pumps that differ significantly in size and performance. Science and innovation. 2023. Vol. 19, No. 19(5). P. 71–88.
7. Долгополов С. I. Експериментально-розрахункове визначення коефіцієнтів гідродинамічної моделі кавітуючих насосів рідинних ракетних двигунів. Техн. механіка. 2024. № 3. С. 67–85. <https://doi.org/10.15407/itm2024.03.067>
8. Долгополов С. I. Математичне моделювання режимів запирання при кавітаційних автоколиваннях у гідравлічних системах з кавітучими насосами РРД. Техн. механіка. 2020. № 4. С. 35–42. <https://doi.org/10.15407/itm2020.04.035>
9. Долгополов С. I. Математичне моделювання жорстких режимів збудження кавітаційних автоколивань у системі живлення рідинних ракетних двигунів. Техн. механіка. 2021. № 1. С. 29–36. <https://doi.org/10.15407/itm2021.01.029>
10. Пилипенко О. В., Долгополов С. И., Николаев А. Д., Хоряк Н. В. Математическое моделирование запуска многодвигательной жидкостной ракетной двигательной установки. Техн. механика. 2020. № 1. С. 5–18. <https://doi.org/10.15407/itm2020.01.005>
11. Dolgoplov S., Nikolayev O., Khoriak N. Dynamic interaction between clustered liquid propellant rocket engines under their asynchronous start-ups. Propulsion and Power Research. 2021. Vol. 10, No. 4. P. 347–359. <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2021.12.001>
12. Pylypenko O. V., Prokopchuk O. O., Dolgoplov S. I., Nikolayev O. D., Khoriak N. V., Pysarenko V. Yu., Bashliy I. D., Polskykh S. V. Mathematical modeling of start-up transients at clustered propulsion system with POGO-suppressors for Cyclon-4M launch vehicle. Space Science and Technology. 2021. Vol. 27, No. 6 (133). P. 3–15. <https://doi.org/10.15407/knit2021.06.003>
13. Пилипенко О. В., Долгополов С. I., Хоряк Н. В., Николаев О. Д. Методика визначення впливу внутрішніх та зовнішніх факторів на розкид тяги рідинного ракетного двигуна при його запуску. Техн. механіка. 2021. № 4. С. 7–17. <https://doi.org/10.15407/itm2021.00.007>
14. Долгополов С. I. Визначення впливу внутрішніх та зовнішніх факторів на розкид тяги двигунної установки, що складається зі зв'язки кількох двигунів. Техн. механіка 2022. № 2. С. 47–58. <https://doi.org/10.15407/itm2022.02.047>
15. Pylypenko, O. V., Dolgoplov, S. I., Nikolayev, O. D., Khoriak, N. V., Kvasha, Yu. A., Bashliy, I. D. Determination of the Thrust Spread in the Cyclone-4M First Stage Multi-Engine Propulsion System During its Start. Science and Innovation. 2022. Vol. 18, No. 6. P. 97–112.
16. Пилипенко О. В., Николаев А. Д., Башлий И. Д., Долгополов, С. И. Математическое моделирование динамических процессов в системе питания маршевого двигателя космических ступеней ракет-носителей на активных и пассивных участках траектории полета. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26, № 1. С. 3–17. <https://doi.org/10.15407/knit2020.01.003>
17. Pylypenko O. V., Smolensky D. E., Nikolayev O. D., Bashliy I. D. The approach to numerical simulation of the spatial movement of fluid with forming free gas inclusions in propellant tank at space flight conditions. Space Science and Technology. 2022. Vol. 28, No. 5. P. 3–14. <https://doi.org/10.15407/knit2022.05.003>
18. Пилипенко О. В., Николаев О. Д., Башлий И. Д., Заволока О. М. Підхід до чисельного моделювання просторових рухів газорідинного середовища в паливному баку космічного ступеня в умовах мікрогравітації з урахуванням гарячої зони. Техн. механіка. 2022. № 4. С. 3–15. <https://doi.org/10.15407/itm2022.04.003>
19. Николаев А. Д., Башлий И. Д., Свириденко Н. Ф., Хоряк Н. В. Определение параметров движения границы раздела сред «газ – жидкость» в топливных баках ракет-носителей космических ступеней на пассивных участках полета. Техн. механіка. 2017. № 4. С. 26–40. <https://doi.org/10.15407/itm2017.04.026>
20. Pylypenko O. V., Dolgoplov S. I., Nikolayev O. D., Khoriak N. V. Mathematical modeling of the transient processes in propulsion system of the upper stage of the Cyclone-4M launch vehicle. Science and Innovation. 2024. Vol. 20, No. 1. P. 49–67.

21. Пилипенко О. В., Ніколаєв О. Д., Башлій І. Д., Хоряк Н. В. Підхід до аналізу поздовжньої стійкості рідинної ракети-носія пакетної схеми компонування. Техн. механіка. 2022. № 3. С. 3–15. <https://doi.org/10.15407/itm2022.03.003>
22. Pylypenko O. V., Degtyarev M. A., Nikolayev O. D., Klimenko D. V., Dolgoplov S. I., Khoriak N. V., Bashliy I. D., Silkin L. A. Providing of POGO stability of the Cyclone-4M launch vehicle. Space Science and Technology. 2020. Vol. 26, No. 4 (125). P. 3–20. <https://doi.org/10.15407/knit2020.04.003>
23. Nikolayev O. D., Bashliy I. D., Khoryak N. V. Computation of the POGO self-oscillation parameters in dynamic "propulsion – rocket structure" system by using of 3D structural model. Техн. механіка. 2018. № 2. P. 17–29. <https://doi.org/10.15407/itm2018.02.017>
24. Николаев А. Д., Хоряк Н. В., Серенко В. А., Клименко Д. В., Ходоренко В. Ф., Башлий И. Д. Учет диссипативных сил при математическом моделировании продольных колебаний корпуса жидкостной ракеты, Техн. механіка. 2016. № 2. С. 16–31.
25. Dolgoplov S., Nikolayev O. Features of mathematical modeling of nonlinear Pogo oscillations of launch vehicles. CEAS Space Journal. 2024, March. Vol. 16, Issue 2. P. 32–48. <https://doi.org/10.1007/s12567-024-00541-3>
26. Pylypenko O. V., Dolgoplov S. I., Khoriak N. V., Nikolayev O. D. Evaluation of the scatter of liquid launch vehicle POGO oscillation amplitudes due to the influence of the scatter of internal factors. Space Science and Technology. 2024. Vol. 30, No. 3 (148). P. 3–15. <https://doi.org/10.15407/knit2024.03.003>
27. Николаев О. Д., Башлій І. Д., Хоряк Н. В., Бондаренко С. Г. Вплив шорткості поверхні камери енергетичної установки на низькочастотні автоколивання холодного робочого газу. Техн. механіка. 2023. № 3. С. 3–17. <https://doi.org/10.15407/itm2023.03.003>
28. Башлій І., Ніколаєв О., Марчан Р. Низькочастотні коливання продуктів згоряння в камері рідинного ракетного двигуна малої тяги, виготовлений за допомогою адитивних технологій. Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2024. № 4 спецвипуск 1 (197). С. 60–68
29. Долгополов С. І., Николаев О. Д. Розробка підходу до математичного моделювання динамічних процесів у ракетному двигуні твердого палива. Техн. механіка. 2024. № 4. С. 10–16. <https://doi.org/10.15407/itm2024.04.010>
30. Николаев О. Д., Башлій І. Д., Клименко Д. В., Хоряк Н. В. Взаємодія акустичних коливань продуктів згоряння в камері енергетичної установки з вібраціями корпусу. Техн. механіка. 2025. № 1. С. 3–17. <https://doi.org/10.15407/itm2025.01.028>
31. Николаев О. Д., Башлій І. Д., Сукачевський В. О. Особливості розвитку акустичних коливань продуктів згоряння в камерах енергетичних установок при використанні компонентів палива з місячних реголітів. Техн. механіка. 2025. № 2. С. 3–16. <https://doi.org/10.15407/itm2025.02.003>
32. Пилипенко М. В. Виброзащитная система объектов ракетно-космической техники при их транспортировке. Техн. механіка. 2020. № 1. С. 120–130. <https://doi.org/10.15407/itm2020.01.120>
33. Николаев Д. О., Хорошилов С. В. Визначення параметрів вібрацій космічного апарата на активній ділянці польоту ракети-носія на основі вогневих випробувань рідинного ракетного двигуна. Техн. механіка. 2024. № 1. С. 3–15. <https://doi.org/10.15407/itm2024.01.003>
34. Nikolayev O., Zhulay Yu., Kvasha Yu and Dzož N. Determination of the vibration accelerations of drill bits with the rotative-vibration well drilling method using the cavitation hydrovibrator. Int. J. Mining and Mineral Engineering. 2020. Vol. 11, No. 2. P. 102–120. <https://doi.org/10.1504/ijmme.2020.108643>
35. Жулай Ю. А., Николаев А. Д. Результаты испытаний и моделирования системы «буровой снаряд с гидровибратором – горная порода». Науковий Вісник Національного Харківського Університету. 2020. № 1. С. 11–17. <https://doi.org/10.33271/nvngu/20201/011>
36. Zhulay Yu. O., Nikolayev O. D. Evaluation of hydraulic power of drilling string with a cavitation hydrovibrator. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2021. No. 3. P. 31–37. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-3/031>

Отримано 03.11.2025,
в остаточному варіанті 04.12.2025