

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

Національного аерокосмічного університету

ім. М. С. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

д.т.н., проф.

Володимир ПАВЛІКОВ

« » 2025

Висновок

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення дисертаційної роботи кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника, співробітника відділу динаміки гідромеханічних і віброзахисних систем Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України **НІКОЛАЄВА Олексія Дмитровича**, на тему: **«Розвиток нелінійної та лінійної теорії поздовжньої стійкості рідинних ракет-носіїв з урахуванням нових уявлень про динамічні процеси в РРДУ та корпусі ракети»**, що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Призначені рішенням Вченої ради Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» (протокол № 6 від 22 січня 2025 р.), а саме:

- БІЛОГУБ Олександр Віталійович, професор кафедри конструкції авіаційних двигунів, доктор технічних наук, професор;
- КУЛІК Анатолій Степанович, професор кафедри систем управління літальними апаратами, доктор технічних наук, професор;
- ФІЛІПКОВСЬКИЙ Сергій Володимирович, професор кафедри проектування літаків та вертольотів, доктор технічних наук, старший науковий співробітник,

розглянувши докторську дисертацію **НІКОЛАЄВА Олексія Дмитровича** «Розвиток нелінійної та лінійної теорії поздовжньої стійкості рідинних ракет-носіїв з урахуванням нових уявлень про динамічні процеси в РРДУ та корпусі ракети»

(тема дисертації затверджена рішенням Вченої ради Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» від 22 січня 2025 р., протокол № 6), що виконана самостійно з передбачуваним її захистом у спеціалізованій вченій раді Д64.062.02, підготували висновок про наукову новизну, теоретичне і практичне значення результатів дисертації:

1. Дисертація є кваліфікаційною науковою працею, що виконана здобувачем самостійно.

2. Дисертація містить наукові положення та науково обґрунтовані результати в галузі ракетно-космічної техніки та теплових двигунів і енергетичних установок до них, які мають практичну та теоретичну цінність.

До нових наукових обґрунтованих положень експертами віднесено:

– набула подальшого розвитку нелінійна теорія поздовжніх коливань рідинних РН з РРДУ. **Вперше** розроблено науково-методичне забезпечення для вирішення **проблеми прогнозування** рівня динамічних складових робочих параметрів РРДУ та амплітуд пружних коливань корпусу рідинних РН при її поздовжній нестійкості, особливістю якого є врахування нелінійної взаємодії пружних просторових коливань корпусу рідинної РН з динамічними процесами в її РРДУ, врахування нелінійних залежностей РРДУ та дисипативних втрат корпусу РН від амплітуд коливань;

– **вперше** запропоновано підхід до визначення параметрів коливань (амплітуд та динамічних навантажень) рідинної РН на основі математичного моделювання нелінійної динамічної взаємодії РРДУ та корпусу РН, в якому використовується одновимірна скінченно-елементна дискретизація щодо систем та агрегатів РРДУ і тривимірна скінченно-елементна дискретизація конструкції РН та рідкого вмісту її паливних баків;

– в рамках моделі в'язкого тертя, що використовується при математичному моделюванні пружних коливань корпусу рідинної РН, **вперше** узагальнено експериментальні значення коефіцієнтів демпфування коливань несучих конструкцій рідинних РН та конструктивно подібних моделей рідинних ракет з рідким паливом в баках в залежності від амплітуд коливань та рівня вмісту баків;

– **вперше** розвинуто підхід до чисельного визначення максимальних величин амплітуд коливань РРД на основі методу гармонічної лінеаризації з використанням інформації про власні комплексні частоти та форми коливань динамічної системи «РРДУ - корпус РН»;

– набула подальшого розвитку лінійна теорія поздовжніх коливань рідинних РН з РРДУ. **Вперше** на підставі результатів математичного моделювання та чисельного дослідження низькочастотних процесів у РРД з допалюванням окислювального генераторного газу теоретично передбачено нестійкість двигуна, обумовлену низькочастотною динамікою контуру «турбонасосний агрегат - газогенератор», яку згодом було експериментально виявлено при вогневих випробуваннях;

– розроблено **новий підхід** до дослідження поздовжньої стійкості РН пакетної схеми з урахуванням взаємодії низькочастотних процесів в маршових рідинних ракетних двигунних установках ступенів РН кожного з блоків та коливань корпусу РН, що відбувається по каналах тяги РРДУ центрального та бічних блоків РН. Підхід базується на застосуванні критерію Найквіста, узагальненого для багатоканальних динамічних систем;

– **вперше** на основі нових отриманих при моделюванні динаміки РРДУ знань показано, що при вирішенні задачі забезпечення поздовжньої стійкості РН частотний діапазон амплітудної стабілізації контуру «РРДУ – корпус РН» може бути розширений шляхом пригнічення резонансного максимуму коефіцієнта підсилення системи живлення РРДУ (по каналу тиску), яке досягається раціональним (з урахуванням нестационарності системи «РРДУ - корпус РН») «налаштуванням» антирезонансної частоти цієї частотної характеристики;

– на основі результатів моделювання нелінійної динамічної системи «РРДУ – корпус РН» отримано **нові уявлення** про взаємодію низькочастотних автоколивань у РРДУ та корпусу РН. Показано, що при розвинених кавітаційних коливаннях з частотою, яка перевищує власні частоти поздовжніх коливань пружного корпусу ракети, в лінеаризованій системі «РРДУ – корпус РН» наростаючі коливання можуть буди одночасно на двох частотах – на частоті коливань корпусу РН і частоті другого тону коливань рідини в живильній магістралі РРДУ. Проте у відповідній нелінійній системі внаслідок конкуренції мод реалізується один автоколивальний режим – або режим з підвищеним рівнем амплітуд коливань корпусу РН, або режим з «пригніченням» поздовжніх коливань корпусу РН. **Виявлено новий ефект** суттєвого зменшення модуля динамічного коефіцієнта проходження малого гармонічного сигналу (по каналу тиску) через систему живлення РРДУ при розвитку в ній кавітаційних автоколивань (з більш високою частотою) у порівнянні зі значеннями модуля коефіцієнта на режимах, де вони відсутні;

– **вперше** на основі математичного моделювання динамічних процесів у РРДУ досліджено динамічну стійкість системи живлення РРДУ космічного ступеня РН з мембранним поділом кріогенних палив у паливному відсіку коаксіального типу та розроблено рекомендації щодо забезпечення стійкості ступеня – спосо-

би стабілізації таких систем повинні ґрунтуватися на коригуванні динамічних властивостей живильних магістралей та насосів двигунів для усунення кавітаційних коливань в РРДУ;

– отримав розвиток підхід до визначення характеристик сорбційних процесів у рідкому паливі РРДУ космічних ступенів РН, що дозволяє при поздовжній нестійкості РН **вперше** врахувати вплив поздовжньо-поперечних польотних вібрацій баків складної просторової конфігурації на сорбційні процеси у рідкому паливі;

– **вперше** розвинена методика для дослідження працездатності пристроїв забезпечення суцільності компонентів палива в РРДУ, в якій враховано вплив частот та амплітуд домінуючих просторових вібрацій РН та динамічних процесів у системах живлення РРДУ космічних ступенів РН на ділянках їх активного та пасивного польоту.

Практична цінність дисертації полягає в тому, що отримані теоретичні результати на основі розробленого науково-методичного та програмного забезпечення для чисельного моделювання, аналізу динамічних процесів в РРД та стійкості рідинних ракет-носіїв, використані у ДП «КБ «Південне» при визначенні поздовжньої стійкості вітчизняних ракет-носіїв тандемної схеми компонування «Дніпро», «Зеніт», «Циклон-4», «Циклон-4М», РКП «Маяк-ЛЗ.0» та РКП «Маяк-ТЗ.0» пакетної схеми компонування; американської РН «Антарес», південнокорейської РН «KSLV-2 (Nuri)», китайської РН CZ-X, а також при аналізі динамічних процесів та визначенні працездатності систем живлення РРДУ верхнього ступеня РН «Циклон-4М», верхнього ступеня арабської РН. Застосування результатів дослідження витікає з численних публікацій автора та Актів впровадження. Акти ДП «КБ «Південне»» про впровадження результатів наукових досліджень надано у Додатку до дисертації.

3. Дисертація виконана за спеціальністю 05.05.03 – Двигуни і енергетичні установки, яка відноситься до технічної галузі науки за Переліком наукових спеціальностей, затверджених наказом МОН № 1057 від 14.09.2011.

4. Дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки, зокрема напрямам досліджень «Теорія двигунів і енергоустановок, експериментальні дослідження процесів у них, дослідження та розрахунки нових схем або типів, теоретичні основи їх проектування, узгодження з характеристиками об'єктів призначення та споживачами енергії. Комп'ютерно-інтегроване проектування двигунів і енергоустановок» та «Фізичне та математичне моделювання, системний аналіз і синтез термодинамічних, гідродинамічних, газодинамічних, електродинамічних, електрохімічних та інших процесів у двигунах, енергоустановках і їх елементах».

5. Наведені в дисертації висновки обґрунтовані і базуються на одержаних і наведених результатах. Їх достовірність підтверджена чисельними експериментами. Основними з них експерти вважають:

- розробка науково-методичного забезпечення для вирішення проблеми прогнозування рівня динамічних складових робочих параметрів РРДУ (тиску, витрат, температури в різних перерізах РРД, частоти обертання валу ТНА) та амплітуд пружних коливань корпусу рідинних РН при поздовжній нестійкості РН (POGO) дозволила за допомогою розрахунку визначати часові інтервали та частоти виникаючих поздовжніх коливань РРДУ та РН, забезпечити моделювання нелінійної взаємодії пружних просторових коливань корпусу рідинної РН з динамічними процесами в її РРДУ, врахувати ефекти нелінійного демпфування коливань рідинної РН залежно від амплітуд і нелінійностей оболонок паливних баків з урахуванням обмеження прогинів їх стінок і днищ, врахувати ефекти нелінійностей динамічних процесів у РРДУ (систем живлення, кавітаційних явищ у насосах) та конструкційного демпфування, а також вплив нестационарності робочих процесів при польоті РН;
- запропонований підхід до визначення параметрів коливань рідинної РН на основі математичного моделювання нелінійної динамічної взаємодії РРДУ та корпусу РН, в якому використовується одновимірне скінченно-елементне представлення систем та агрегатів РРДУ і тривимірне скінченно-елементне дискретизація конструкції РН та рідкого вмісту її паливних баків;
- отримані нові уявлення про взаємодію низькочастотних коливань у РРДУ та поздовжніх коливань корпусу РН дозволили розвинути теоретичні підходи до вирішення проблеми забезпечення поздовжньої стійкості рідинних РН; так виявлено ефект суттєвого зменшення значень модуля динамічного коефіцієнта проходження малого сигналу (по каналу тиску) через систему живлення РРДУ при розвитку в ній кавітаційних автоколивань у порівнянні з його значеннями на режимах без кавітаційних автоколивань; визначено, що при розвинених кавітаційних автоколиваннях в РРДУ із частотою, що перевищує резонансні частоти коливань пружного корпусу ракети, у динамічній системі «РРДУ – корпус РН», одночасно з частотою коливань корпусу РН та з частотою другого тону коливань рідини в живильній магістралі РРДУ, внаслідок конкуренції мод реалізується один з автоколивальних режимів – або режим зі значними амплітудами коливань корпусу РН, або режим з «пригніченням» поздовжніх коливань корпусу РН.

6. Дисертація викладена логічно, легко читається, з чітко поставленими цілями і засобами їх досягнення.

7. В дисертації особисто дисертантом розв'язано науково-практичну проблему прогнозування амплітуд поздовжніх коливань РН, які можуть призвести до втрати стійкості робочого процесу у РРДУ, що можуть бути спричинені кавітаційними явищами в насосах, динамічними процесами в газових трактах та системах регулювання РРД, створюючи передумови до розвитку резонансних процесів POGO в динамічній системі «РРДУ – корпус РН».

8. Експертами не виявлено порушень принципів академічної доброчесності.

9. Основні положення кандидатської дисертації не є складовими положень докторської дисертації автора (п. 4. УХВАЛИ... Висновку Вченої ради Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України про дисертаційну роботу Ніколаєва О. Д.).

10. Кількість та якість наукових праць, опублікованих за матеріалами дисертації, відповідають постанові Кабінету Міністрів України № 1197 від 17 листопада 2021 року «Деякі питання присудження (позбавлення) наукових ступенів», що затверджує «Порядок присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук». Основні положення та наукові результати дисертаційної роботи викладено у 56 наукових статтях у фахових виданнях за переліком МОН України (включених до категорій «А», «Б»), з них 30 праць у наукових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз (у тому числі, 11 – у Scopus і Web of Science (3 публікації у виданнях Scopus Q1 і Q2)). Крім того, 8 праць додатково відображають результати дисертації, у тому числі результати, що захищені 6 патентами України та авторськими свідоцтвами; 10 праць засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

11. Дисертація пройшла широку апробацію на численних семінарах і конференціях в Україні (15 конференцій) і за її межами (5 конференцій).

З урахуванням актуальності теми дослідження, наукової новизни, теоретичного та практичного значення одержаних результатів, впровадження їх у практику, обґрунтованості висновків на основі одержаних достовірних результатів, особистого внеску здобувача у розв'язання важливої науково-технічної проблеми, достатньої повноти викладення матеріалів дисертації, що характеризується єдністю змісту, відповідності принципам академічної доброчесності, а також, беручи до уваги наукову зрілість та професійні якості **Ніколаєва Олек-**

сія Дмитровича, рекомендувати дисертацію «Розвиток нелінійної та лінійної теорії поздовжньої стійкості рідинних ракет-носіїв з урахуванням нових уявлень про динамічні процеси в РРДУ та корпусі ракети» для подання до розгляду у спеціалізовану вчену раду на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 - двигуни та енергетичні установки.

Рецензенти:

Професор кафедри кон-
струкції авіаційних двигунів На-
ціонального аерокосмічного
університету
ім. М. Є. Жуковського «Харків-
ський Авіаційний інститут»,
доктор технічних наук, профе-
сор



Олександр БІЛОГУБ

Професор кафедри систем
управління літальними апаратами Національного аерокосмічного університету
ім. М. Є. Жуковського «Харків-
ський Авіаційний інститут»,
доктор технічних наук, профе-
сор



Анатолій КУЛІК

Професор кафедри проек-
тування літаків і вертольотів,
Національного аерокосмічного
університету
ім. М. Є. Жуковського «Харків-
ський Авіаційний інститут»,
доктор технічних наук, старший
науковий співробітник



Сергій ФІЛПКОВСЬКИЙ



Сергій Єлифанов
Сергій Суховій