

## Відгук

офіційного опонента на дисертацію **Шевченко Сергія Андрійовича** на тему «**Удосконалення пневмосистеми запуску ракетних двигунів шляхом стабілізації тиску робочого тіла та поліпшення її динамічних характеристик**», подану на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

### Актуальність теми.

Результати дослідження мають відношення до аерокосмічної галузі в аспекті забезпечення працездатності пневматичних систем рідинних ракетних двигунів (РРД) та їх конкурентоздатності в світі. На останніх ступенях ракет-носіїв (РН) переважно застосовуються РРД, що потребують багаторазового включення в залежності від орбіти, на яку виводять супутник. Для запуску РРД верхніх ступенів РН із насосною системою подачі компонентів палива в камеру згоряння застосовують різні засоби, у тому числі здійснюють розкручування ротора турбонасосного агрегату (ТНА) за допомогою стисненого газу, що зберігається на борту РН у балоні високого тиску з використанням пневматичної системи запуску. Така система запуску має істотний недолік – при витраті газу тиск у балоні падає і параметри запуску можуть змінюватись. Для ідентичності запусків (надійності РН в цілому) необхідно забезпечити стабільний тиск в колекторі соплового апарата турбіни. Для вирішення цієї задачі в пневмосистему запуску включено розроблений і всебічно досліджений дисертантом регулятор тиску газу з пневматичним керуванням, що має високу пропускну спроможність. Для вибору оптимальних значень конструктивних параметрів пневмосистеми запуску та зменшення часу на розробку на стадії проектування важливим завданням є розробка математичної моделі, що описує динамічні характеристики пневмосистеми запуску. Причому відомі розрахункові методи дослідження пневмосистем різного призначення не можуть бути безпосередньо застосовані для вирішення цього завдання, оскільки не враховують специфічних конструктивних і функціональних особливостей даного пристрою, і вимагають істотного уточнення та доробки. В результаті досліджень на двигуні РД861К РН «Циклон-4» реалізована нова пневмосистема запуску

Вважаю, що тема дисертаційного дослідження, спрямованого на вдосконалення пневмосистеми запуску РРД і розробку конструкції регулятора тиску газу з високою пропускнуною спроможністю, що надійно працює в системі

разом з іншими агрегатами і компонентами, актуальна та спрямована на поліпшення динамічних та експлуатаційних характеристик пневмосистем запуску рідинних ракетних двигунів багаторазового включення.

### **Загальна характеристика роботи**

Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних джерел інформації і семи додатків. Обсяг дисертації – 301 сторінка, з яких 159 сторінок основного тексту, 138 рисунків і 15 таблиць на 75 сторінках, 6 рисунків за текстом, список використаних джерел з 117 найменувань (12 сторінок), 7 додатків (55 сторінок). Обсяг і структура роботи відповідає вимогам до кандидатських дисертацій.

У **вступі** дано загальну характеристику дисертації, обґрунтовано актуальність дослідження, сформульовано мету і основні завдання дисертаційної роботи, визначено наукову новизну, практичне значення і особистий внесок здобувача.

**Перший розділ** містить опис схем та пристроїв для запуску РРД, розроблених в Україні і СРСР, їх недоліків и переваг. Детально наведено схему та опис пристрою та його компонент, що автор прийняв до подальшого аналізу і розвитку. Наведено та проаналізовано відомі методи динамічного розрахунку пневмосистем, зокрема: дискретні моделі та континуальні моделі для розрахунку трубопроводів; моделі обмеження швидкостей і інваріантів при залповому вкиданні газу; методи розрахунку температури стінки порожнини; розрахунку сили замикання пружини з урахуванням коливань її витків та рівняння стану для газоподібного робочого тіла. За результатами розділу сформульовано ціль роботи – поліпшення характеристик пневмосистеми запуску за рахунок використання регулятора тиску газу з пневматичним управлінням і впровадження рекомендацій по налаштуванню параметрів цього регулятора, розроблених на основі експериментальних і розрахункових досліджень пневмосистеми. Перелічено конкретні завдання, які необхідно виконати для досягнення мети.

**Другий розділ** містить постановку і вирішенні задач уточнення математичної моделі пневмосистеми запуску РРД і моделі для обчислювання її динамічних характеристик. Доведена збіжність отриманих розрахункових даних з результатами лабораторних і вогневих випробувань. Висновки по

розділу відповідають роботі, що виконана.

**Третій розділ** присвячено розробці математичної моделі і методики розрахунку статичних деформацій і напружень у вусах фторопластової манжети з конічними бічними поверхнями, що використовується для ущільнення клапана й поршнів регулятора тиску газу пневмосистеми запуску РД. Отримано уточнені формули для розрахунку сили тертя і коефіцієнта тертя в залежності від тиску і швидкості ковзання вуса манжети.

У **четвертому розділі** для дослідження динамічної стійкості системи складена спрощена дискретно-континуальна нелінійна динамічна модель багаторазового включення, виведено характеристичне рівняння, що зв'язує частоти й амплітуди гармонічних нелінійних вільних коливань клапана основного регулятора пневмосистеми та запропонований новий графоаналітичний метод знаходження уявних коренів характеристичного рівняння, що визначають коливальну границю динамічної стійкості системи.

У **п'ятому розділі** описаний пневматичний стенд для експериментального дослідження динамічних характеристик пневмосистеми в умовах лабораторії. За результатами досліджень змінена конструкція регулятора з метою усунення закидів вихідного тиску на початку включення, а також зменшений діаметр дроселя в лінії пневматичного управління. Підтверджено всі положення, висунуті в попередніх розділах щодо врахування фізичних ефектів, що діють в елементах системи пневмозапуску.

У **висновках** наведено основні результати роботи, а також теоретичні та практичні їх аспекти. Із висновків зрозуміло, що мета досліджень була досягнута, а всі завдання виконані.

Наукові результати, що автор виносить на захист: Вперше врахована інерційність газу при його витіканні із сферичних балонів і отримана формула для розрахункової оцінки приведеної маси газу, що дозволило уточнити розрахункові частоти й амплітуди коливань газу у вхідному трубопроводі пневмосистеми та домогтися їхньої збіжності з результатами експерименту.

3. Вперше на основі моделі реального газу Абеля виконано коректування формул Сен-Венана для витрати гелію через отвір, при якому враховані фактор стисливості гелію та ефект Джоуля-Томсона. Це дозволило уточ-

нити темп зниження тиску в балоні й одержати динамічні характеристики пневмосистеми запуску РРД, близькі до результатів експерименту.

4. Вперше для манжетного ущільнення, яке виготовлено із фторопласту й забезпечено розпірною пружиною пелюсткової форми, розроблена математична модель для розрахунку напружень, деформацій і зазорів, які виникають у його деталях при роботі в регуляторі тиску газу, що дозволило визначити розрахункові величини сили тертя й витоків газу, які підтверджені експериментально.

5. Вперше при гармонійній лінеаризації коливань витрати газу через дросель врахована стисливість газу у глухій камері, що дало можливість за допомогою аналітичних співвідношень зв'язати характеристики стійкості й коливальності пневмосистеми запуску РРД із розмірами трубопроводів, діаметром жиклера лінії управління й для оптимізації динамічних характеристик розробити порядок настроювання системи на автоколивання малої амплітуди.

6. Вперше розроблений і проведений експеримент для визначення швидкості поширення хвилі тиску газу по каналу з гофрованою стінкою, що дозволило уточнити вплив вихідного тракту лабораторного стенда на динамічні характеристики пневмосистеми.

Основні наукові результати дисертаційного дослідження опубліковані у 15-ти наукових статтях, серед яких 2 у закордонних й 13 у вітчизняних спеціалізованих виданнях, затверджених ВАК України, з них 5 у наукових журналах і 10 у збірниках наукових статей; у 6 тезах доповідей на міжнародних конференціях і конгресах; у 3 патентах, один з них відзначений Дипломом і Золотою медаллю ІХ Міжнародного салону винаходів і нових технологій «НОВОЕ ВРЕМЯ», 2013 р.

Основні положення і висновки були отримані автором з використанням результатів експериментальних досліджень, які підвищують достовірність і обґрунтованість отриманих результатів.

#### **Зауваження щодо змісту та оформлення дисертації та автореферату**

Дисертацію викладено в логічній послідовності, стилістично та орфографічно правильно. Стиль викладення результатів досліджень та висновків забезпечує легкість сприйняття матеріалу. Оформлення дисертації відповідає встановленим вимогам МОН України.

Текст і зміст автореферату в цілому відповідає таким в дисертації і до-

статньо повно відображує основні положення і висновки.

В якості **зауважень** доцільно відзначити наступне:

1. В інформаційних джерелах відсутні посилання на роботи, що було зроблено в світі – американські, європейські, китайські та ін.
2. Не наведено жодної схеми (конструкції, пристрою), щодо таких систем, які використовують двигунобудівники не з України чи Росії (СРСР) – чи вони такі самі, чи є різниця і, як що є, то в чому?
3. Відомо, що в даний час широкого поширення набули різні пакети прикладних програм, що дозволяють вирішувати (розраховувати) стаціонарні та нестационарні процеси як в двовимірній так і в тривимірній постановці. В огляді (перший розділ) про такі можливості немає жодних згадок. На стор. 61 написано «... величина при работе на гелии вычисляется по формуле  $\Delta f = K_{z,d} \cdot \mu f, \dots(2.3)$ , где для регуляторов 6, 16 коэффициент  $K_{z,d}$  составляет 0.5 и 0.3 (рис. 2.2, 2.3), а для пневмоклапана 5 равен 1.4; для воздуха его значения уменьшаются на 0.1...» по-перше що таке поз. 6, 16 и 5, на який рисунок посилання? По-друге – формула (2.3) діє тільки для гелію? Рисунок 2.9 наведено через 2 стор. після звертання, що ускладнює читання тексту. Таких місць в дисертації досить багато. Табл. 2.5, 2.6 – порівняльні результати розрахунку-експерименту. Експеримент не описано, які там постійні часу, тощо? Формула 2.37 – пропущено  $p$ . Рисунки, що мають відношення до попереднього підрозділу неведені в наступному (наприклад стор. 103, 104). Як зрозуміти наступний вислів: «...на предположении, что (по причине действия в регуляторе очень сильной обратной связи)...» (стор. 133) – наскільки «потужний» зворотній зв'язок, і яка буде математична модель щодо «слабкого» зворотного зв'язку?
11. П.п. 4,5 висновків по четвертому розділу не мають класичного і чіткого опису в самому розділі. Є результати і непрямий натяк на те, що розроблено методику проведення експерименту.
12. В авторефераті написано, що «...за результатами вогневих випробувань установлена добра збіжність розрахункових і експериментальних значень для частот автоколивань (похибка менша за 2%)». В четвертому розділі дисертації така інформація відсутня.

#### **Висновки про відповідність дисертації вимогам "Порядку присудження наукових ступенів".**

Зазначені недоліки не є визначальними і загалом неістотно впливають

на достовірність отриманих результатів та не знижують їхню наукову цінність.

Зміст дисертаційної роботи відповідає паспорту спеціальності 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати з наступних напрямків: «... теоретичні й експериментальні дослідження робочого процесу... гідропневмоагрегатів усіх типів, а також їх вузлів та елементів»; «... розроблення та вдосконалення методики розрахунку і проектування гідромашин усіх типів, їх вузлів та елементів, зокрема ... методів оптимізації робочого процесу та прогнозування характеристик ...»; «... розроблення та вдосконалення конструкцій ... гідропневмоагрегатів, їх вузлів та елементів».

Дисертація **Шевченко С. А.** є закінченою науково-дослідною працею, виконана автором самостійно на високому науковому та практичному рівні. В дисертації розв'язана актуальна наукова та практично значуща задача підвищення надійності й поліпшення динамічних і масово-габаритних характеристик пневмосистеми запуску маршового РРД багаторазового включення верхнього ступеня ракети-носія із насосною схемою подачі палива.

Теоретичні та практичні результати дисертації в повній мірі відповідають вимогам до дисертацій, що подаються до захисту на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, зокрема пунктам 9, 11 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р., а її автор – **Шевченко Сергій Андрійович** заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати.

Офіційний опонент, доктор технічних наук, професор, професор кафедри авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. Н.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

 О.В. Білогуб

Підпис проф. Білогуба О.В. засвідчую.  
Вчений секретар, канд. наук держ. упр., доп.

 Ю.А. Нужнова

Відзнак надійшов 23.08.2017 р.  
Вчений секретар спец. ради 064.050.11

 О.О. Юдін