

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора, проректора з наукової роботи, професора кафедри мехатронних систем тракторів та сільськогосподарських машин Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного,

Панченка Анатолія Івановича,

на дисертаційну роботу **Павлової Катерини Сергіївни**

**«МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ
АВІАЦІЙНОЇ ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ»,**

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю

134 – Авіаційна та ракетно-космічна техніка

Актуальність теми дисертаційної роботи.

З другої половини 20 століття в світі почала активно розвиватися робототехніка, яка автоматизує багато функцій, що до цього виконувалися людиною. Складовою цієї техніки є приводи – гідравлічні, пневматичні та електромеханічні. Прогрес у авіації, як складової загальної техніки, також пов'язаний із використанням зазначених пристроїв. Саме із використанням приводів пов'язана точність систем керування авіаційної та ракетно-космічної техніки.

Україна в даний період знаходиться у пошуку імпорту заміни систем керування, що використовуються на літаках. На цьому шляху виникають певні серйозні труднощі, які стосуються коректного математичного моделювання фізичних процесів, оскільки наявні свої системи ще далекі від досконалих, бо дають велику помилку у роботі.

Тому розробка адекватних моделей систем керування авіаційної та ракетно-космічної техніки, в яких якомога точно моделюються фізичні процеси при роботі зазначених систем, є актуальним науково-технічним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами.

Згідно з планом науково-дослідних робіт кафедри гідро газових систем здобувачкою виконано ряд досліджень по темі «Дослідження фізичних процесів в гідравлічних і пневматичних пристроях та елементах конструкцій рідинно-газових систем літальних апаратів» (№ держреєстрації 0122U201453). Згідно з проведеними дослідженнями, отримані матеріали є корисними для проведення подальших наукових досліджень по моделюванню та розрахунку фізичних процесів, що відбуваються в системах керування авіаційної техніки та розробки нових методів та підходів при викладанні дисциплін для здобувачів СВО «Бакалавр» та «Магістр».

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Положення щодо наукової новизни та практичного значення отриманих результатів дисертаційної роботи Павлової Катерини Сергіївни є достатньо обґрунтованими. Дані, отримані в результаті теоретичних досліджень, цілком співпадають з результатами експериментів та узгоджуються із відомими дослідженнями, чим підтверджено теорію дисертаційного дослідження. Представлені в роботі моделі нестационарної течії рідини та її взаємодії із конструкцією є цілком логічними і мають переваги над існуючими, оскільки охоплюють більш ширший діапазон фізичних чинників, що впливають на зазначені процеси.

Аналітичні розв'язки, отримані внаслідок теоретичного розрахунку, завдяки своїй новизні, істотно розширюють уявлення про фізичні процеси, зокрема про нестационарні течії рідини (однорідної та бульбашкової) та їх взаємодії із конструкцією в системах керування авіаційної та ракетно-космічної техніки.

Результати дисертаційної роботи пройшли апробацію на всеукраїнських, міжнародних конференціях, а також є впровадженими у навчальний процес.

Достовірність результатів, отриманих в дисертації, не викликає сумнівів, розширюючи сучасні уявлення щодо гідравлічного удару в однорідній та бульбашковій рідинах, що відбувається в системах керування авіаційної та ракетно-космічної техніки. Теоретичні дослідження апробовано та обговорено на конференціях та статтях у журналах, включених до переліку наукових фахових видань України категорії «Б» за спеціальністю 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка».

Отримані в роботі результати базуються на загально визнаних фізичних законах. Для розв'язання задач використовуються відомі аналітичні та чисельні методи, що є складовою системи символічних і чисельних обрахунків Maple.

До основних нових наукових результатів дисертаційної роботи слід віднести:

вперше:

- обґрунтовано важливість сукупного врахування конвекції та стаціонарного тертя залежність молекулярної в'язкості в моделі нестаціонарної течії (гідравлічний удар) крапельної рідини;
- розроблено аналітичну модель, що дозволяє описувати формування та поширення ударного імпульсу в бульбашковій рідині із урахуванням конвекції та тертя;
- отримано аналітичну функціональну залежність поля тиску від швидкості поширення ударного імпульсу – як для моделі крапельної так і бульбашкової рідини;
- розроблено аналітичну модель, що описує взаємодію нестаціонарної течії бульбашкової рідини зі структурою; модель є цілком оригінальною, так як вперше, для даної задачі, застосовано перехід до автомодельної змінної;

набули подальшого розвитку:

- теорія гідравлічного удару у крапельній рідині, зокрема вказано на важливість урахування конвекції та в'язкості при описі зазначеного фізичного процесу;

- теорія гідравлічного удару у бульбашковій рідині, зокрема здійснено перехід від спрощеної лінійної моделі до більш повної, яка враховує нелінійні ефекти конвекції та тертя;

удосконалено

- модель взаємодії нестационарної течії крапельної рідини зі структурою (твердим деформованим тілом, всередині якого тече рідина); удосконалення полягає в оригінальному підході – переходу до автомодельної змінної та отримання автомодельного рівняння разом із його розв'язком;

- математичну модель процесу випускання та прибирання шасі літака;
- математичну модель роботи об'ємного гідроприводу;
- математичну модель первинного контролю закрилками літака, зокрема обґрунтовано важливість нелінійного зв'язку між рухом штоку та кутом повороту закрилком.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Практичне значення отриманих результатів дисертаційної роботи Павлової Катерини Сергіївни матиме своє продовження при впровадженні в навчальний процес, що підтверджено відповідними актом та довідкою впровадження (с. 154-155 дисертаційної роботи).

Науково-практичне значення дисертаційного дослідження полягає в тому, що вироблене розуміння важливості урахування в моделях нестационарних течій рідини (гідравлічний удар) сумісного використання ефектів конвекції та тертя. Крім того, показано, що вказані ефекти також важливі для опису так званої

бульбашкової рідини, яка відповідає реальній робочій рідині, що функціонує у рідинних системах літаків і вертольотів. Ще одним практичним значенням є те, що рух поршню гідроциліндра описується одним із можливих видів нестационарної течії рідини, що вказує на взаємозв'язок зазначених явищ. Отримані нелінійні моделі взаємодії нестационарного руху рідини (ударний імпульс), при їх урахуванні в моделях первинного контролю літака, неодмінно покращать точність керування при польоті. Практично важливим є отриманий результат про те, що рух закрилка та штока привода не описується лінійними співвідношеннями, бо при кутах повороту закрилка близьких до пів радіану вже суттєва ця не лінійність.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Результати наукового дослідження Павлової Катерини Сергіївни опубліковано в 11 наукових працях. Серед них 4 статті у журналах, включених до переліку наукових фахових видань України категорії «Б» за спеціальністю 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка».

Тому, сукупність опублікованих наукових праць, в яких викладено результати досліджень дисертаційної роботи, відповідає вимогам пп. 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктор філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44.

Оцінка змісту дисертаційної роботи.

Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 155 сторінок. Дисертація містить 22 рисунки. Список використаних джерел у кількості 127 найменувань на 13 сторінках. 2 додатки розміщено на 2 сторінках.

Вступ містить аналіз теми роботи, обґрунтовано її актуальність та сформульовано мету, завдання і методи дослідження. У вступі також надано інформацію про наукову новизну та практичне значення отриманих в дисертаційній роботі результатів.

У першому розділі розглянуто існуючу диференціальну модель випускання та прибирання шасі (бічної та передньої) літака, яка потім вдосконалена у дисертаційній роботі. Досить ретельно виконано огляд джерел стосовно моделей різноманітних приводів: гідравлічного, електрогідравлічного, електромеханічного. Увагу зосереджено на використанні моделей тертя Штрібека, яка використовується при описі роботи системи керування закрилками літака – в рамках його первинного контролю.

Продовжує огляд робіт тематика, яка стосується нестационарної течії рідини (гідравлічного удару). Тут в роботі наводяться джерела, які висвітлюють зазначену тематику, починаючи з робіт Рімана середини 19 століття та Жуковського із Аллієві ближче до кінця цього століття. Важливість урахування гідравлічного удару у роботі гідравлічних приводів також обговорюється. Зроблено огляд робіт, як класичних так і сучасних, з моделювання гідравлічного удару в крапельній рідині.

Особливий розділ огляді займає тема гідравлічного удару в бульбашковій рідині. Це пояснюється тим, що під час роботи в системі (у рідині) виникають, завдяки кавітації, бульбашки газу. Тож урахування двох фазності робочого середовища має сенс. Наводиться огляд робіт щодо моделей гідравлічного удару в бульбашковій рідині. Увага привертається до двох основних підходів. Перший – вивчення поведінки однієї бульбашки під час проходження ударного імпульсу. Другий підхід враховує реологію бульбашкової рідини і базується на механіці гетерогенних середовищ. Саме на підставі цього підходу в роботі розвинуто моделі гідравлічного удару в бульбашковій рідині.

Оскільки рідина тече не десь там, а в певній структурі (конструкції), то цілком логічним є урахування взаємодії нестационарної течії (ударного імпульсу) із стінками труби або іншої конструкції, де відбувається вказане фізичне явище. Тож в роботі наведено огляд досягнень у цьому науковому напрямку. Зокрема, зазначається те, що моделювання базується на лінійних моделях і не враховує стаціонарне тертя (модель Вайсбаха-Дарсі) та нестационарне (модель Бруно-Вітковського).

Завершує перший розділ обговорення того, як за різними підходами, стандартним та нестандартним, отримуються різні аналітичні розв'язки.

У другому розділі розглянуто декілька питань. Це-подальше вдосконалення моделі випускання та прибирання шасі. Вдосконалення полягає в урахуванні в моделі налипання снігу та ожеледь, а також різкий поривчастий вітер, швидкістю якого вже неможна нехтувати у порівнянні зі швидкістю злітання та приземлення літака.

Основну увагу притягує другий підрозділ. В ньому, на прикладі моделі керування закрилками малого літака, показано, що лінеаризація співвідношення між ходом штоку приводу та кутом повороту закрилка не є припустимою. Отримані результати порівнюються із відомими, що наявні у вільному доступі. Йдеться про функціональну залежність положення штоку та пов'язані із цим величини.

У третьому та четвертому підрозділах другого розділу наводяться аналітичні розв'язки, які описують, відповідно, роботу гідравлічного приводу із об'ємним регулюванням та частинний розв'язок руху штоку під час гідроудару. Зроблено важливий висновок про необхідність більш ретельного вивчення процесу поширення ударного імпульсу в рідині, оскільки це впливає на роботу систем керування.

Продовжують дисертаційну роботу фундаментальні дослідження фізичних процесів формування та поширення ударного імпульсу в гідравлічних системах

літаків та вертольотів, що представлені у третьому розділі. Так, у першому підрозділі третього розділу отримала подальший розвиток теорія гідравлічного удару в крапельній рідині. Зокрема врахований спільний ефект тертя рідини о стінку та конвекція поля швидкості. Також розглянуто вплив молекулярної дифузії. Цікавим результатом є те, що в роботі отримані аналітичні залежності тиску від швидкості поширення ударного імпульсу. Наявні порівняння результатів із іншими роботами.

У другому підрозділі третього розділу представлено нелінійну модель гідравлічного удару в бульбашковій рідині. Наведено строгу математичну модель рідини із наявністю невеликої кількості бульбашок газу. В модель додано два нелінійних фізичних механізми -- конвекції та тертя рідини о стінки. Так само як і для однорідної крапельної рідини, отримані аналітичні залежності «тиск-швидкість поширення ударного імпульсу». Оскільки математично модель є досить складною, то в роботі використовується наближені (асимптотичні) методи. Особливо слід зазначити, що обрані в роботі математичні методи є оригінальними в тому сенсі, що вони не повторюють жодну з цитованих робіт.

У четвертому розділі можна побачити логічне розширення досліджень, в яких вже враховується деформація стінки конструкції, де відбувається формування та первинне поширення ударного імпульсу.

Уся новизна моделювання, а це конвекція поля швидкості і урахування нелінійного механізму тертя, знайшла своє відображення у нелінійній моделі взаємодії нестационарної течії рідини зі структурою (конструкцією). Слід відзначити чітке фізичне і математичне формулювання задачі, послідовність викладення думок, яка містить порівняння із вже відомими моделями.

Привертає увагу аналіз впливу кожного чинника, який було привнесено у нелінійну модель. Основним результатом можна вважати те, що швидкість поширення істотно залежить від координат і головне – спадає до нуля, підкреслюючи відмінність ударного імпульсу від хвилі. Цілком фізичним є

отриманий в роботі результат, де у оливі АМГ-10 ударний імпульс приблизно у 4 рази більш зосереджений ніж у воді.

Далі в роботі розглянуто формування ударного імпульсу в бульбашковій рідині. Тут слід відзначити, що модель стає досить складною, з математичної точки зору, Фізичний аналіз отриманих залежностей ускладнюється. Але в роботі все ж вдалося отримати такі результати, які корелюють (якісно) із відомими – отриманими за лінійною моделлю.

У додатках наведено акт впровадження та довідка впровадження результатів, отриманих в роботі, в навчальний процес.

Академічна доброчесність.

Під час аналізу дисертаційної роботи, порушень академічної доброчесності в тексті роботи та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати, не виявлено.

Авторський внесок співавторів у публікаціях.

1. Lukianov P.V., Pavlova K.S. Unsteady flow of droplet liquid in hydraulic systems of aircrafts and helicopters: models and analytical solutions. *Aerospace technics and technology*. 2024. №. 1. P. 32-42.

Особистий внесок Pavlova K.S. Розв'язання задач, аналіз отриманих результатів.

2. Lukianov P.V., Pavlova K.S. Unsteady flow in bubble liquid in hydraulic system of aircraft and helicopters. *Aerospace technics and technology*. 2024. №. 2. P. 4-14.

Особистий внесок Pavlova K.S. Концептуалізація, розвиток математичної моделі, використання пакетів програм для розв'язку задач, аналіз результатів.

3. Лук'янов П.В., Павлова К.С.. Нелінійна динаміка в системі первинного контролю польотом. *Механіка гіроскопічних систем*. 2024. Випуск 47. С. 17-27.

Особистий внесок Павлової К.С. Формулювання завдання, використання

пакетів програм для розв'язку задач, аналіз результатів.

4. Lukianov P.V., Pavlova K.S. Nonlinear model of interaction of unsteady fluid flow with structure in hydraulic systems of aircraft and helicopters. *Aerospace technics and technology*. 2024. №.4, P. 4-14.

Особистий внесок Pavlova K.S. Концептуалізація, використання пакетів програм для розв'язку задач, розвиток математичної моделі, аналіз результатів.

Оцінка мови та стилю дисертації. Згідно з вимогами по оформленню дисертацій, затверджених МОН України наказом №40 від 12.11.2017 року, дисертаційна робота за структурою, мовою та стилем викладення має повну відповідність. Мова та стиль викладання в дисертаційній роботі чітко та ґрунтовно висвітлюють одержані науково-практичні результати.

Зауваження та питання щодо оформлення та змісту дисертації:

1. Згідно вимог до оформлення дисертації особистий внесок здобувача бажано було вказати в дисертації.
2. Незрозуміло чому в розділі 2 в якості прикладу системи керування наведено електромеханічний привід (сторінки 50-57), хоча далі в роботі (розділи 3-4) використовуються дослідження, пов'язані із гідравлічними явищами.
3. На сторінці 76, в розділі 3.1.2, зазначено про тонкість ударного шару, але не вказано від яких параметрів залежить товщина цього шару.
4. У розділі 4, в системі рівнянь (4.24)-(4.27), чітко не вказано фізичний зміст параметрів Nu_1 , Nu_2 , Nu_3 , Nu_4 .
5. На рис. 4.2. наведено одну криву (для мастила АМГ-10). Для наочного порівняння бажано б було додати ще хоча б одну криву, наприклад для води.
6. Кількість подання графічного матеріалу є доволі обмеженою. Це, певним чином, ускладнює розуміння результатів роботи.

Проте, зазначені зауваження не зменшують цінність отриманих дисертантом результатів.

Загальний висновок

На підставі вище наведеного вважаю, що дисертаційна робота здобувачки ступеня доктора філософії Павлової Катерини Сергіївни на тему «Моделювання фізичних процесів в системах керування авіаційної та ракетно-космічної техніки» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних завдань розв'язує наукове завдання, що має важливе значення для галузі знань 13 – «Механічна інженерія».

Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувачка Павлова Катерина Сергіївна заслуговує присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка».

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
Таврійський державний агротехнологічний
університет імені Дмитра Моторного,
проректор з наукової роботи,
професор кафедри мехатронних систем тракторів
та сільськогосподарських машин



Підпис: Анатолія ПАНЧЕКО

Засвідчую.

Начальник відділу кадрів

Анатолій ПАНЧЕНКО

Катерина ГАНЧУК