

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Шестакова Олексія Олександровича на тему «Математичне моделювання гідравлічних процесів в повітряно-теплових протикригових системах при критичних та близьких до критичних режимах»,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

### **Актуальність теми.**

Одним із актуальних завдань сьогодення в галузі літакобудування є підвищення енергоефективності літака за рахунок зменшення відборів потужності на допоміжні системи. Це стосується, зокрема, необхідності зменшення кількості повітря, що відбирається від силових установок (СУ) на потреби літака. При відборі повітря від силової установки наявна потужність двигуна суттєво знижується. Одним з основних споживачів повітря є повітряно-теплова протикригова система (ПТ ПКС), яка забезпечує підведення необхідної кількості тепла до заданої поверхні. Тому зменшення кількості повітря, що відбирається від силової установки на потреби повітряно-теплової протикригової системи, при збереженні її ефективної роботи, є актуальною технічною задачею.

Вирішення цієї задачі можна забезпечити на основі розвитку методів та засобів математичного моделювання процесів в ПТ ПКС, а також розробки програмно-апаратних систем та засобів натурного і напівнатурного моделювання.

Вимоги до моделей процесів в ПТ ПКС обумовлені також необхідністю їхньої реалізації безпосередньо в складі діючих реальних технічних систем і натурних стендів, а саме: похибки моделювання повинні бути співрозмірні з похибками використовуваних при замірах пристроїв; описували втрати тиску у всьому експлуатаційному діапазоні роботи ПТ ПКС; визначали як сумарну кількість повітря, що поступає в роздаточний трубопровід (РТ), так і його розподіл вздовж роздаточного трубопроводу.

Відомі математичні моделі, які є основою теплового розрахунку, в ході якого встановлюється необхідна величина теплового потоку в кожній з її ділянок ПТ ПКС, та гідравлічних розрахунків роздаточного трубопроводу для визначення фактичного значення кількості повітря, що поступає на кожну з ділянок через роздаточний трубопровід, мають неприпустимо великі похибки. На основі цих моделей сумарна кількість повітря через РТ при критичних та близьких до критичних режимах течії визначається з похибкою в десятки відсотків. Оцінки розподілу повітря уздовж трубопроводу по ділянках є ще більш грубими. Тому, для гарантії безпеки польотів в умовах обледеніння, розрахункова кількість повітря, що відбирається від двигуна на потреби ПТ ПКС, при проектуванні системи, розраховується «із запасом», що суттєво знижує енергоефективність літака.

Тому створення математичних моделей процесів в елементах гідравлічної розподільчої мережі ПТ ПКС та в системі в цілому при критичних та близьких до критичних режимах течії є актуальним науково-прикладним завданням.

Актуальність проблеми, важливість та перспективність отриманих результатів підтверджується також тим, що робота виконана відповідно до “Державної комплексної програми розвитку авіаційної промисловості в Україні до 2010 року”, затвердженою Постановою Кабінету міністрів України від 12.12.2001 р. № 1665-25. Дослідження виконані в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України відповідно до НДР «Методи і засоби моделювання при проектуванні малих теплоенергетичних систем» (шифр «ЦИКЛЮД – 5», № 0105U000999) 2005-2007 рр. в якій автор був виконавцем розділу 7, а також в АНТК ім. О. К. Антонова, в рамках експериментальних і науково-дослідницьких робіт із створення літака АН 148 – 200 № 000.00.757.223ПМ «Программа гидравлических испытаний раздаточного трубопровода используемых в воздушно теплових пртивообледенительных системах» 2005-2009 р.р., яка була виконана під керівництвом автора, та підтверджено актом про впровадження в АНТК ім. О. К. Антонова.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.**

Основні наукові результати в дисертації в цілому обґрунтовані теоретично та підтверджені широким обсягом експериментальних досліджень і впровадженням в дослідні та серійні зразки нової техніки в галузі високих технологій. Автором коректно застосовано для теоретичного обґрунтування наукових положень та висновків дисертаційної роботи: методи теорії систем при дослідженні процесів у роздаточному трубопроводі, методи математичного моделювання при обґрунтуванні моделі гідравлічних процесів в елементі «раптове розширення каналу»; основні положення теорії багатofакторного експерименту і теорії похибок при формуванні тарирувальної характеристики витратомірного пристрою, призначеного для виміру витрати стискуваної рідини, яка витікає з близько розташованих вихідних отворів РТ при критичному та близькому до критичного перепаді тиску на них; методи прикладної статистики при обробці експериментальних даних; методи комп'ютерного моделювання для підтвердження адекватності розроблених моделей та встановлення меж їх застосування.

Обґрунтовані теоретичні результати зіставлені з відомими в літературних джерелах, відповідними результатами комп'ютерного моделювання та результатами натурних експериментів на гідравлічних стендах. Обсяги експериментальних досліджень та впровадження є достатніми для підтвердження наукових положень дисертаційної роботи.

Проте не в усіх практичних задачах, що підтверджують теоретичні положення, в достатній мірі наведено особливості програмних засобів моделювання та експериментального отримання даних.

Не зважаючи на вказане, в цілому наукові положення і висновки,

сформульовані в дисертаційній роботі є обґрунтованими теоретично та підтверджені практичним впровадженням в дослідних та серійних зразках нової техніки відповідального призначення.

### **Достовірність результатів досліджень.**

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю постановки математичних задач дослідження та використанням відповідних математичних методів, відповідністю математичних моделей фізичній суті процесів, що описуються в роботі і оцінкам меж їх застосування. Розроблені в дисертації математичні моделі ґрунтуються на фундаментальних законах рівноваги та збереження, на методах системного аналізу і теорії систем, математичній теорії диференціальних рівнянь, методах математичного моделювання і прикладної статистики, результати підтверджено їх практичним використанням.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Запропоновано математичну модель РТ, як основного елемента ГРМ ПТ ПКС, яка, на відміну від відомих, заснована на моделі одновимірного руху з тертям стислої рідини в трубі постійного перетину при постійній повній температурі, де для визначення втрат повного тиску використовується коефіцієнт гідравлічного опору, розрахований для нестискуваної рідини (метод приведеної довжини). Використання запропонованої моделі РТ при проектуванні ПТ ПКС дозволяє забезпечити надходження потрібної кількості повітря в заданий об'єм ПТ ПКС в усіх режимах функціонування системи, за рахунок чого зменшується кількість необхідного для ПТ ПКС повітря та підвищується енергоефективність літака.

2. Вперше отримано математичний опис гідравлічних процесів для вихідного отвору РТ як особливого виду трійника для випадків транзитного потоку стискуваної рідини і без нього, який, на відміну від відомих, дозволяє отримати коректні результати розрахунків у всьому діапазоні швидкості повітря на вихідному отворі. Визначено фактори, що впливають на величину коефіцієнта гідравлічного опору, на підставі яких отримана математична залежність для коефіцієнта опору та одержані числові коефіцієнти. З урахуванням експериментальних даних визначено область її застосування, що охоплює весь діапазон роботи ПТ ПКС та дає змогу визначати необхідні діаметри вихідних отворів.

3. Вперше запропоновано математичну модель гідравлічних процесів в елементі «раптове розширення каналу», в якій на відміну від відомих раптове розширення замінюється множиною  $n$  раптових розширень з площею перетину, що рівномірно збільшується, де у випадку нестикуваної рідини забезпечується рівність сумарного коефіцієнта опору для загального раптового розширення, розрахованого згідно формули Бордо-Карно. Використання даної (всережимної) математичної моделі забезпечує коректне моделювання гідравлічних процесів в цих елементах для усіх режимів течії включно з критичними, що значно поширює область її застосування.

4. Розроблено математичну модель гідравлічних процесів у запропонованому витратомірному пристрої (ВП), призначеного для виміру витрати стискуваної рідини, яка витікає з близько розташованих вихідних отворів РТ при критичному та близькому до критичного перепаді тиску на них, на основі якої отримано витратні (тарувальні) характеристики. На підставі вимірювання витрат за допомогою ВП на всіх отворах РТ експериментально підтверджено, що похибка сумарного значення витрат повітря не перевищує 2% від величини витрат виміряної сертифікованою трубкою Вентурі.

#### **Значущість отриманих результатів для науки і практичного використання.**

Значущість отриманих результатів для науки полягає у розвитку теоретичних положень щодо математичного моделювання об'єктів та систем технічного призначення, а саме, процесів в елементах гідравлічної розподільчої мережі ПТ ПКС та в системі в цілому при критичних та близьких до критичних квазістаціонарних режимах течії. Створений комплекс взаємопов'язаних нових математичних моделей дає можливість вирішити актуальне науково-прикладне завдання, пов'язане із протиріччям між вимогами високої точності моделювання процесів в ПТ ПКС та забезпечення низької обчислювальної складності реалізації цих моделей на реальних об'єктах, що у сукупності забезпечує у перспективі створення нового покоління високоефективних ПТ ПКС.

Значущість результатів дисертаційного дослідження для практики полягає у тому, що запропонований в дисертаційній роботі комплекс математичних моделей є науково-методичною основою розробки та проектування високоефективних ПТ ПКС.

**Практичне значення** полягає у розробці та реалізації у вигляді програмного забезпечення натурних стендів математичних моделей процесів в елементах гідравлічної розподільчої мережі ПТ ПКС, які дозволили виконати розробку, відладку і випробування таких систем для низки серійних та дослідних літаків.

□ Запропонована модель РТ при проектуванні ПТ ПКС дозволяє зменшити кількість необхідного для ПТ ПКС повітря при збереженні її ефективності. Для літаків типу АН–148 / АН–158 це складає майже 30%, що покращує їх енергоефективність;

– Створено розрахунковий модуль гідравлічного розрахунку ГРМ ПТ ПКС, інтегрований в програмний комплекс розрахунку ГРМ систем кондиціонування повітря, а також автономна комп'ютерна програма, яка використовується при інженерних розрахунках РТ;

□ Спроектовано ВП для виміру витрати стискуваної рідини, що витікає з вихідних отворів РТ, при критичному та близькому до критичного перепаді тиску на них, для якого, на основі розробленої математичної моделі витратомірного пристрою, отримана його гідравлічна витратна характеристика. При відповідному підборі вихідних трубок на ВП профіль швидкості потоку,

що виходить з отвору, не деформується, та досягається потрібна для інженерних розрахунків точність.

Результати роботи впроваджено на ДП Антонов, та використовувались при розробці ПТ ПКС планера літаків АН – 158, АН – 178 и АН – 132, а також при розробці ПТ ПКС двигуна АН – 70 та систем кондиціонування літаків АН – 178, АН – 132.

Отримані результати можуть бути використані: у науково-дослідних установах, конструкторських бюро та на підприємствах у галузі газотурбобудування для математичного моделювання процесів в повітряно-розподільчих системах з метою дослідження режимів, створення програмного забезпечення стендів-імітаторів та проектування бортових і наземних технічних засобів; для навчальних цілей у вищих навчальних закладах Міністерства освіти і науки України.

### **Повнота викладення результатів в опублікованих матеріалах.**

Основні наукові результати дисертації опубліковані в 5 статтях у фахових наукових журналах і збірниках наукових праць і в 6 інших наукових виданнях, матеріалах і тезах наукових конференцій, зокрема в 5 матеріалах і тезах міжнародних наукових конференцій, у тому числі 1 стаття в журналі, індексованому в міжнародних наукометричних базах даних; 1 стаття в закордонному періодичному журналі. Проте географія публікацій є обмеженою.

В опублікованих працях викладено в повному обсязі основні отримані результати. Особистий внесок здобувача в сумісних публікаціях є підтвердженим. Рівень та кількість публікацій, рівень апробації відповідають вимогам, що ставляться до кандидатських дисертацій в Україні, хоча для підтвердження світового рівня результатів дисертації її бажано було б більш широко апробувати на міжнародному рівні.

### **Структура та зміст дисертації.**

Дисертацію викладено на 217 сторінках, з яких основний зміст роботи викладений на 150 сторінках. Робота складається зі вступу, основного змісту, що включає чотири розділи, висновків, списку використаних джерел з 94 найменувань та 5 додатків на 57 сторінках.

*У вступі* обґрунтована актуальність теми дослідження, встановлений зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, сформульована мета роботи, основні напрями досліджень і методи їх вирішення. Надані опис об'єкту і предмету досліджень, викладені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, наведені відомості про апробацію результатів роботи і публікації.

Слід зауважити, що математичні моделі «елементів гідравлічної розподільчої мережі (ГРМ) ПТ ПКС та системи в цілому» (с.с. 6,7) та «гідравлічних процесів в повітряно-теплових протикригових системах» (с. 8) не цілком співпадають, останнє формулювання, що винесено на титул дисертації і є предметом досліджень, є більш точним. Це стосується також об'єкту

досліджень (с. 8) .

*У першому розділі* проведений аналіз структури ГРМ ПТ ПКС та визначені типові конструктивні елементи (КЕ), з яких вона формується. Проведено аналіз існуючих математичних моделей типових КЕ та визначені ті з КЕ, математичні моделі яких потребують уточнення або необхідна розробка нової моделі. Виконаний аналіз результатів розрахунків на основі існуючих математичних моделей РТ і «раптового розширення каналу»

Проведено критичний аналіз існуючих математичних моделей в предметній області, а також засобів математичного моделювання процесів в ПТ ПКС. Сформульовано вимоги до математичних моделей процесів в ПТ ПКС для їх чисельної реалізації. На основі проведеного огляду і порівняльного аналізу застосованих методів і засобів математичного моделювання встановлена теоретична значущість і прикладна необхідність проведення досліджень у напрямі створення нових математичних моделей процесів, що відбуваються у роздаточному трубопроводі та при раптовому розширенні каналу, які дозволяють використовувати ці моделі в усьому діапазоні режимів течії, включаючи критичні. Обґрунтовано мету та основні задачі дисертаційного дослідження.

*Основними недоліками* цього розділу є те, що обґрунтування вимог до моделей, які створюються в дисертаційній роботі ґрунтується виключно на працях вітчизняних вчених. Зокрема, це стосується висновку 1. Немає персоніфікації досягнень зарубіжних вчених в галузі математичного моделювання для зазначеної предметної області із детальним аналізом особливості побудови математичних моделей. До недоліків також можна віднести надмірну деталізацію надто загальних характеристик методів розрахунку при розробці повітрянорозподільчих систем, створених на теренах СНД і відсутність ґрунтового порівняння із зарубіжними аналогами. Дискусійною є теза переваг підходу, заснованого на гідравлічному розрахунку, перед підходом, заснованому на рішенні рівнянь Нав'є-Стокса.

*У другому розділі* дисертації виконана детальна, поелементна декомпозиція ГРМ ПТ ПКС, виконано аналіз конструкції існуючих ГРМ ПТ ПКС сучасних літаків, який показав, що такі системи складаються з типових КЕ, які можуть розміщуватися в довільному порядку. Математична модель гідравлічної мережі ПТ ПКС в цілому в дисертації представляється як сукупність математичних моделей елементів, структурно пов'язаних між собою по лініях їх граничного перетину.

В розділі розкрито центральну ідею досліджень, суть якої полягає у створенні комплексу таких математичних моделей процесів в ПТ ПКС, які відповідають їх структурі та квазістаціонарним процесам в елементах гідравлічної розподільчої мережі ПТ ПКС та в системі в цілому при критичних та близьких до критичних режимах течії.

В розділі побудовані математичні моделі різних груп конструктивних елементів ГРМ ПТ ПКС, математична модель конструктивного елемента ГРМ ПТ ПКС – «раптове розширення каналу (поток)». узагальнена математична модель роздаточного трубопроводу, математичні моделі вихідного отвору без

транзитного потоку та за наявності транзитного потоку, загальна структура математичної моделі ГРМ ПТ ПКС. Виконано порівняння експериментальних даних з розрахунковими по пропонованій моделі «раптове розширення каналу (поток)», та отриманих методом об'ємного моделювання.

*Основними недоліками* цього розділу є наступне.

- В тексті (с. 67) наведено результати порівняння експериментальних даних з розрахунковими по пропонованій моделі та отриманих методом об'ємного моделювання. Як це видно з рис. 2.5 (с. 67), експериментальні дані співпадають з розрахунком програмою “сеть ВЭ”, і не співпадають з розрахунком програмою ANSYS, що викликає сумнів щодо коректності її використання.
- Візуалізація розрахунку на рис. 2.4 (с. 60) не підтверджує тезу на с. 57 щодо вихроутворення.
- Підрозділ 2.3 (с. 68) з назвою “Математичні моделі ...” математичних моделей не містить.
- В підрозділі 2.4.2 (с. 76) не пояснено, яким чином враховуються характеристики транзитного потоку, що відповідають реальним умовам.
- Рівняння 2.17 (с. 81) є трансцендентним, однак в роботі не міститься пояснень, як з нього отримується СЛАУ (с. 82).
- Висновок 6 по розділу (с. 90) потребує пояснення, чому тривимірний розрахунок дає гірші результати, за яких умов та причин це можливо.
- Автором застосовуються рекурентні співвідношення, наприклад, для вирішення задачі поточкорозподілу (с. 85), але не наведені умови збіжності таких процедур. Відомо, що при застосуванні рекурентної форми алгоритмів має місце ефект накопичування похибки обчислень, але в роботі така особливість обчислювальної реалізації не досліджується.
- Як відомо, при збільшенні числа Рейнольдса турбулізації потоку передують напіввпорядковане вихроутворення у вигляді “стежки Кармана”. В роботі таке явище не досліджується.

*У третьому розділі* представлені результати експериментальних досліджень на гідравлічних стендах. У розділі приводиться план експериментальних досліджень, обробка отриманих результатів за допомогою статистичних методів, та опис гідравлічних стендів, використаних для отримання експериментальних даних, розробці витратомірного пристрою. *Основні зауваження* до цього розділу полягають в наступному.

- На жаль, не ясно, в якій мірі вказані гідравлічні стенди відтворюють реальні умови в ГРМ ПТ ПКС, а також умови реальної експлуатації “швидкість і висота польоту, температура повітря, водність тощо” (с.с. 14, 96).
- Розділ перевантажено загальновідомими матеріалами щодо опису планування експерименту (с.с. 91-95), типів похибок та методів обробки експериментальних даних (с.с. 116-129), які в подальшому майже не використовуються, оскільки в якості критерію порівняння

розрахункових та експериментальних даних надано максимальне відхилення (с.с. 136,137) в відсотках. При цьому не ясно, як розраховано максимальне відхилення: від верхньої межі чи від поточного значення.

- На с. 134 наведено критеріальний вираз (формула 3.7), і його вигляд після обробки експериментальних даних (формула 3.8), які не співпадають за формою подання. Числові константи в формулі 3.8 мають різну точність подання.

**Четвертий розділ** присвячено практичній реалізації результатів роботи. Зокрема, приведено укрупненні блок-схеми алгоритмів розрахунку ГРМ ПТ ПКС, а також окремих КЕ таких як: «раптове розширення каналу РТ», вихідний отвір без транзитного потоку, та вихідний отвір за наявності транзитного потоку. В розділі наведено приклад розрахунку РТ за допомогою автономної розробленої програми, що має діалогове вікно для завдання геометричних параметрів РТ та вікна для отриманих результатів розрахунку у графічному та табличному виді, завдяки яким користувач може отримати достатні дані для проектування РТ.

*Основне зауваження:* не приділено достатньої уваги опису створених програмних засобів, що реалізують розроблені математичні моделі та методи, рівня їх програмної та обчислювальної складності.

*У додатках* наведено допоміжні матеріали, зокрема, схеми гідравлічних стендів, результати експериментальних досліджень, опис програмної реалізації, акт впровадження результатів роботи.

**Автореферат** ідентичний за змістом з основними положеннями дисертації і в повній мірі відображає основні завдання, суть наукових положень, практичну значущість та висновки. Дисертаційна робота та автореферат оформлені у відповідності з вимогами, що ставляться до кандидатських дисертацій в Україні, хоча по тексту дисертації зустрічаються опечатки, невідповідності у посиланні на формули, мають місце стилістичні неточності.

#### **Зауваження до роботи.**

1. Математичні моделі «елементів гідравлічної розподільчої мережі (ГРМ) ПТ ПКС та системи в цілому» (с.с. 6,7) та «гідравлічних процесів в повітряно-теплових протикригових системах» (с. 8) не цілком співпадають, останнє формулювання, що винесено на титул дисертації і є предметом досліджень, є більш точним. Це стосується також об'єкту досліджень (с. 8).

2. В огляді (розділ 1, с. с. 14-42) не міститься посилань на праці закордонних вчених та результати провідних закордонних фірм літакобудування, хоча в тексті автореферату (с. 5) прізвища закордонних вчених згадуються.

3. У другому розділі (с. 67) наведено результати порівняння експериментальних даних з розрахунковими по пропонованій моделі та отриманих методом об'ємного моделювання. Як це видно з рис. 2.5 (с. 67),



експериментальні дані співпадають з розрахунком програмою “сеть ВЭ”, і не співпадають з розрахунком програмою ANSYS, що викликає сумнів щодо коректності її використання. Візуалізація розрахунку на рис. 2.4 (с. 60) не підтверджує тезу на с. 57 щодо вихроутворення. Підрозділ 2.3 (с. 68) з назвою “Математичні моделі ...” математичних моделей не містить. В підрозділі 2.4.2 (с. 76) не пояснено, яким чином враховуються характеристики транзитного потоку, що відповідають реальним умовам. Рівняння 2.17 (с. 81) є трансцендентним, однак в роботі не міститься пояснень, як з нього отримується СЛАУ (с. 82). Висновок 6 по розділу (с. 90) потребує пояснення, чому тривимірний розрахунок дає гірші результати, за яких умов та причин це можливо.

4. Автором застосовуються рекурентні співвідношення, наприклад, для вирішення задачі поточкорозподілу (розділ 2, с. 85), але не наведені умови збіжності таких процедур. Відомо, що при застосуванні рекурентної форми алгоритмів має місце ефект накопичування похибки обчислень, але в роботі така особливість обчислювальної реалізації не досліджується.

5. Як відомо, при збільшенні числа Рейнольдса турбулізації потоку передують напіввпорядковане вихроутворення у вигляді “стежки Кармана”. В роботі таке явище не досліджується.

6. В третьому розділі (с.с. 91-137) представлені результати експериментальних досліджень на гідравлічних стендах. На жаль, не ясно, в якій мірі вказані стенди відтворюють реальні умови в ГРМ ПТ ПКС, а також умови реальної експлуатації “швидкість і висота польоту, температура повітря, водність тощо” (с.с. 14, 96). Розділ перевантажено загальновідомими матеріалами щодо опису планування експерименту (с.с. 91-95), типів похибок та методів обробки експериментальних даних (с.с. 116-129), які в подальшому майже не використовуються, оскільки в якості критерію порівняння розрахункових та експериментальних даних надано максимальне відхилення (с.с. 136,137) в відсотках. При цьому не ясно, як розраховано максимальне відхилення: від верхньої межі чи від поточного значення. На с. 134 наведено критеріальний вираз (формула 3.7), і його вигляд після обробки експериментальних даних (формула 3.8), які не співпадають за формою подання. Числові константи в формулі 3.8 мають різну точність подання.

7. В роботі (четвертий розділ) не приділено достатньої уваги опису створених програмних засобів, що реалізують розроблені математичні моделі та методи, рівня їх програмної та обчислювальної складності (с.с. 138-147).

8. Робота має достатній рівень апробації, але публікації автора переважно стосуються експериментальних досліджень, розрахунків, розроблених методик, моделі та методи викладені в значно меншому числі праць, хоча достатньому щодо вимог. Одним із недоліків дисертаційної роботи є майже відсутність посилань на праці інших авторів, опублікованих за останні п’ять років, зокрема, зарубіжних вчених.

9. Зауваження щодо оформлення дисертації. У дисертаційній роботі мають місце загальні недостатньо коректні вислови типу “воздух является сжимаемой жидкостью”, “в данной работе”, “как известно из теории” та ін.,

зустрічаються опечатки, невідповідність у посиланнях на формули, неточності у позначеннях у формулах, що ускладнює сприйняття матеріалу дисертації. Деякі позначення співпадають, зокрема коефіцієнт витрат (с.с. 4,15,105) та коефіцієнт кінематичної в'язкості (с.с. 110, 134, с. 14 автореферату). Зустрічаються ідентичні фрагменти у різних підрозділах, наприклад, на с. 45 та на с. 65. В списку літератури деякі джерела не мають повних вихідних даних (наприклад праці за №№ 31, 32, 35, 42, 45 та ін.).

Незважаючи на висловлені зауваження, в цілому дисертація справляє позитивне враження завдяки ґрунтовності теоретичних та експериментальних досліджень

### **Загальні висновки.**

Оцінюючи роботу в цілому, вважаю, що дисертаційна робота Шестакова Олексія Олександровича на тему «Математичне моделювання гідравлічних процесів в повітряно-теплових протикригових системах при критичних та близьких до критичних режимах» є завершеною науковою працею, в якій отримані нові, науково обґрунтовані та практично важливі результати, що у сукупності вирішують науково-практичне завдання розробки математичної моделі ГРМ ПТ ПКС, яка адекватно відображає фізичну картину процесів, що відбуваються в роздаточних трубопроводах при критичному та близькому до критичного перепаді тиску на вихідних отворах і може використовуватися в інженерних розрахунках при проектуванні РТ.

Основні результати дисертації відповідають вимогам паспорту наукової спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, зокрема формулі спеціальності та абзацам 1,3 у розділі II.

Дисертаційна робота за своїм змістом відповідає вимогам п.п. 9, 11, 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» щодо дисертацій на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук, а її автор – Шестаков Олексій Олександрович заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

### **ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:**

Завідувач кафедри електротехніки та систем ракетно-артилерійського озброєння  
Військової академії (м. Одеса),  
д.т.н., доцент



Миргород В.Ф.

