ВІДГУК

офіційного опонента **Васька Петра Федосійовича**
на дисертаційну роботу **Хорєва Олега Миколайовича**
«Наукові основи покращення технічних характеристик турбомашин для гідро- та гідроакумулюючих електростанцій»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки.

Актуальність теми дисертаційної роботи

Гідроенергетика України є невід'ємною частиною електроенергетичного комплексу країни. Гідроагрегати покривають пікову частину загального графіка навантаження і слугують аварійним і частотним резервом електросистеми, вони часто працюють у режимі синхронного компенсатора і забезпечують як вироблення, так і споживання реактивної електроенергії. Умови функціонування гідроагрегатів в складі електросистеми характеризуються частими пусками та зупинками, роботою в широких діапазонах зміни навантаження, що супроводжується розвитком кавітаційних процесів та зниженням ККД. Сучасні методи досліджень динаміки руху гідравлічних потоків в проточних частинах гідроагрегатів надають можливості оптимізувати роботу турбіни у всьому діапазоні зміни напорів та витрат. Зменшення пульсацій тиску, вібрацій та мінімізація ерозійних руйнувань безпосередньо подовжують ресурс обладнання та зменшують потребу в частих ремонтах за динамічних режимів роботи гідроагрегатів.

Тому вважаю тему дисертації Хорєва О.М., її мету і пов'язані з нею завдання досліджень актуальними.

Дисертація виконувалась згідно плану наукових досліджень Інституту енергетичних машин та систем ім. А.М. Підгорного в межах держбюджетних науково-дослідних робіт НАН України та договорів, де дисертант був відповідальним виконавцем і/або виконавцем окремих розділів. Перелік 7-ми тем НДР, що мають державну реєстрацію, наведено в дисертації та рефераті.

Актуальність теми дисертаційної роботи Хорєва О.М. засвідчують також публікації результатів досліджень в періодичних наукових виданнях, індексованих в наукометричній базі Скопус.

Вх 158/2026
від 29.10.2026

Обґрунтованість і достовірність результатів дисертаційних досліджень обумовлена коректністю вихідних передумов і прийнятих обмежень, прийнятною збіжністю результатів числових і експериментальних досліджень, порівняльним аналізом відомих і отриманих автором наукових результатів.

Теоретичні дослідження базуються на використанні методів математичного моделювання течії нестисливої в'язкої рідини на основі числового інтегрування осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса з додатковим членом, що містить штучну стисливість. Моделювання турбулентних ефектів виконувалось за допомогою диференціальної двопараметричної моделі Ментера.

Експериментальні дослідження фізичних моделей насос-турбін проведено на атестованому гідродинамічному стенді ЕКС-30, технічні показники якого відповідають міжнародним стандартам по проведенню модельних випробовувань гідромашин.

Методи дослідження відповідають поставленим задачам і забезпечують достатньо ефективне їх розв'язання та досягнення сформульованої мети роботи.

Наведені аргументи дозволяють визнати достовірними наукові результати, основні положення та висновки прикладних досліджень дисертації.

Наукова новизна результатів роботи

Робота присвячена вирішенню актуальної наукової і науково-практичної проблеми покращення технічних характеристик і розширення діапазону експлуатації турбомашин для гідроелектростанцій (ГЕС) і гідроакумулювальних електростанцій (ГАЕС). В результаті виконання дослідницьких завдань було отримано низку нових наукових результатів, зокрема:

1. Вперше для турбомашин ГЕС і ГАЕС запропоновано універсальний метод просторового профілювання лопатей осьових і радіально-осьових робочих коліс, який базується на застосуванні навалів у коловому і осьовому напрямках. Це дозволило формалізувати єдиний підхід до гідродинамічного вдосконалення проточних частин та забезпечити підвищення енергетичних характеристик у широкому діапазоні зміни робочих режимів;

2. Вперше встановлено закономірності впливу величин колових і осьових навалів лопатей робочих коліс осьових поворотно-лопатевих турбін на структуру потоку, кінематичні і енергетичні показники у відсмоктувальній трубі; що дозволяє забезпечити взаємне узгодження структури потоку в елементах проточної частини та підвищити енергетичну ефективність турбіни як при проектуванні нових, так і під час модернізації існуючих об'єктів гідроенергетики.

3. Вперше встановлено науково обґрунтовані закономірності взаємозв’язку між величинами колових навалів лопатей робочих коліс радіально-осьових насос-турбін середньої швидкохідності і структурою просторового потоку та енергетичними показниками в турбінному і насосному режимах. Отримані результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень дозволили визначити напрямки гідродинамічного вдосконалення робочих коліс та обгрунтувати розширення діапазону експлуатації насос-турбін гідроакумулювальних електростанцій.

4. Вперше експериментально встановлено закономірності впливу просторового профілювання лопатей радіально-осьових робочих коліс насос-турбін на пульсаційні характеристики і амплітудно-частотні спектри тиску у відсмоктувальній трубі, що дозволило знизити амплітуди тиску при роботі в зоні часткових навантажень;

5. Вперше експериментально встановлено характер змін амплітудно-частотних спектрів і амплітуд пульсацій тиску у відсмоктувальній трубі насос-турбін середньої швидкохідності при встановленні у дифузор стабілізуючих вирівнювальних ребер, що дозволило забезпечити обмеження впливу вихрового джгута на режимах часткового навантаження та знизити значення амплітуд пульсацій тиску.

6. Вперше на основі чисельних та експериментальних досліджень встановлено закономірності впливу геометричних параметрів сплітерів робочих коліс радіально-осьових насос-турбін середньої швидкохідності на структуру потоку та енергетичні характеристики в турбінному і насосному режимах. Виявлені залежності дозволили обґрунтувати вибір найбільш раціональних геометричних параметрів сплітерів для мінімізації гідродинамічних втрат та розширення діапазону ефективної роботи в зону часткових навантажень.

7. Набув подальшого розвитку метод проектування робочих коліс радіально-осьових турбомашин шляхом використання встановлених зв'язків між просторовою формою лопатевих систем та енергетичними характеристиками. Метод базується на додатковому урахуванні величин навалів та конфігурації вхідних і вихідних кромок, що дозволяє покращувати характеристики турбомашин у розширеному діапазоні зміни режимів експлуатації.

Отримані в дисертаційному дослідженні нові наукові результати обгрунтовують напрямки пошуку раціональної взаємодії лопаті з потоком води в області вхідних кромок, в каналі робочого колеса і на вході у відсмоктувальну трубу. Такий підхід надає можливостей теоретичного узгодження параметрів проточної частини і зменшення обсягу довготривалих досліджень на гідродинамічному стенді.

Докладне застосування результатів експериментальних досліджень навантажувальних робочих процесів, отриманих на гідродинамічному стенді, який пройшов метрологічну атестацію, суттєво підвищує наукову значущість результатів дисертаційної роботи.

Практичне значення результатів дисертаційних досліджень

Результати роботи мають суттєве прикладне значення для проектування нових і модернізації існуючих турбомашин для ГЕС і ГАЕС. Вони надають можливості проектувати більш ефективні проточні частини турбін і насос-турбін для розширених діапазонів зміни параметрів режимів експлуатації. Це дозволяє проектувати ефективні проточні частини турбін і насос-турбін на малі напори, зокрема 80–125 м для ГАЕС. Результати досліджень обґрунтовують доцільність використання швидкохідних робочих коліс зі збільшеною кількістю лопатей складної просторової форми для насос-турбін та використання вирівнювальних ребер у дифузорі відсмоктувальної труби. Зокрема, застосування просторового профілювання лопатей робочих коліс осьових гідротурбін на основі складних навалів в осьовому й окружному напрямках дозволило розробити нове робоче колесо високоефективної низьконапірної осьової поворотно-лопатевої гідротурбіни ПЛ20/3271М, що планується як базова для реконструкції ГЕС Дніпровського каскаду.

Результати досліджень впроваджено в проекти модернізації Кременчуцької ГЕС та ГЕС Дхаліпур (Індія), а також при розробленні насос-турбіни для трьох наступних гідроагрегатів Дністровської ГАЕС, що засвідчено відповідними актами.

Зміст дисертаційної роботи.

Робота складається з анотації, вступу, 6 розділів, переліку літературних джерел, висновків до роботи, двох додатків.

У вступі наведено актуальність теми досліджень, зв'язок з науковими програмами, мету і завдання роботи; об’єкт, предмет та методи досліджень. Сформульовано наукову новизну і практичне значення досліджень, наведено дані про апробацію і особовий внесок дисертанта у написані в співавторстві публікацій.

Перший розділ присвячено огляду сучасного стану і значення ГЕС і ГАЕС у світі і в Україні. Розглянуто основні шляхи розв’язання проблеми підвищення ефективності і розширення діапазону експлуатації турбомашин. Проаналізовано роботи, присвячені числовим і експериментальним методам дослідженням робочого процесу в проточних частинах турбомашин різного типу. Показано, що однією з головних причин обмеження роботи при часткових режимах є утворення вихрового джгута за робочим колесом. Розглянуто методи зниження його інтенсивності. Показано, що основним шляхом покращення технічних характеристик турбомашин для ГЕС і ГАЕС є просторове профілювання лопатей робочого колеса та розроблення нових конструктивних рішень у проточній частині.

У другому розділі розглянуто і обґрунтовано застосування в роботі методів дослідження робочого процесу в проточних частинах турбомашин. Математичне моделювання течії нестисливої в’язкої рідини виконано за допомогою чисельного інтегрування рівнянь Нав’є-Стокса з додатковим членом, що містить штучну стисливість. Моделювання турбулентних ефектів виконувалось за допомогою диференціальної двопараметричної моделі Ментера (*SST*). Числове інтегрування рівнянь виконано за допомогою неявної квазімонотонної схеми Годунова другого порядку апроксимації за простором і часом. Всі основні числові дослідження робочого процесу проведено за допомогою програмного комплексу *IPMFlow* (ІЕМС), в якому реалізовано

розроблені математичні моделі, алгоритми і числовий метод. Виконано апробацію запропонованих методів, проведено порівняння експериментальних і числових результатів.

Експериментальні дослідження насос-турбін проведено на атестованому гідродинамічному стенді ЕКС-30, наведено його схему і основні показники.

Третій розділ присвячено розробленню методу просторового профілювання лопатей шляхом застосування навалів різного типу і проведено детальний числовий аналіз робочого процесу в моделях проточних частин в широкому діапазоні зміни параметрів навантажувальних режимів. Проведено аналіз впливу різних типів навалів (прості, складні, осьові, колові, втулкові, периферійні) на зміну структури потоку в каналах робочих коліс і відсмоктувальної труби, загальний ККД розрахункової області та на локальний коефіцієнт кавітації. На основі аналізу впливів комбінованих периферійних навалів було розроблено теоретичне креслення нового робочого колеса, що рекомендовано до впровадження на ГЕС Дніпровського каскаду.

У четвертому розділі обґрунтовано доцільність використання модернізованих швидкохідних робочих коліс насос-турбін ГАЕС на напори 80–125 м. Піддано аналізу збільшена кількість лопатей складної просторової форми з метою підвищити ефективність та розширити діапазон експлуатації в турбінному режимі. Наведено результати числових та експериментальних досліджень робочого процесу у швидкохідній та традиційній моделях, підтверджено перевагу нового варіанта як у насосному, так і у турбінному режимах.

У п’ятому розділі дисертації обґрунтовано доцільність застосування сплітерних робочих коліс як ефективного засобу підвищення ККД радіально-осьових насос-турбін та розширення діапазону їх експлуатації. За результатами числового моделювання робочого процесу та фізичного експерименту на гідродинамічному стенді встановлено залежності структури потоку (поля тиску на поверхнях лопатей, розподіл компонент швидкості) та енергетичних показників від геометричних параметрів сплітерних лопатей. На основі виявлених закономірностей розроблено нову конструкцію робочого колеса з шістьма основними і шістьма вкороченими лопатями-сплітерами, яка

забезпечує підвищення ефективності насос-турбіни, зокрема в умовах часткових навантажень в турбінному режимі.

У шостому розділі основну увагу приділено покращенню технічних характеристик радіально-осьових насос-турбін шляхом зміни просторової форми лопатей за допомогою колових навалів. Визначено їх вплив на структуру течії, на енергетичну ефективність та рівень пульсацій тиску у відсмоктувальній трубі в турбінному та насосному режимах.

Експериментально визначено вплив стабілізуючих вирівнювальних ребер у дифузорі відсмоктувальної труби на енергетичні і пульсаційні характеристики. Це технічне рішення дозволило послабити дію вихрового джгута при роботі на режимах часткових навантажень і зменшити амплітуду небажаних пульсацій тиску.

На основі результатів розрахункових і лабораторних досліджень було встановлено функціональні залежності між геометричними параметрами робочих коліс та ККД в турбінному і насосному режимах. На базі цих даних було розроблено теоретичне креслення нового робочого колеса насос-турбіни , що рекомендовано для впровадження на Дністровській ГАЕС.

Зауваження щодо змісту та оформлення дисертаційної роботи

1. Числовий розв'язок рівняння Нав'є-Стокса в конструкції проточної частини гідротурбіни передбачає дискретизацію досліджуваного простору сукупністю елементарних комірок. Кількість комірок визначає порядок апроксимаційної системи алгебраїчних рівнянь. В роботі в деяких задачах використовується до 5,5 млн комірок, що може вплинути на точність розрахункового результату, яка в значній мірі залежить від топології матриці коефіцієнтів системи рівнянь та співвідношення значення діагонального елемента до суми решти коефіцієнтів в стрічці матриці, а також вибору кроку за часом. Тому без наявності таких експериментальних стендів та програмного забезпечення, що використовувались автором, верифікація результатів числових рішень являє собою окрему складну задачу. Бажано було б надати рекомендації до вибору раціональної дискретизації простору та часу, що буде корисно для проведення подібних розрахунків іншими дослідниками з використанням методів обчислювальної гідродинаміки та відповідних

відкритих програмних продуктів OpenFOAM, ANSYS Fluent, COMSOL Multiphysics , Oasis, тощо.

2. Недостатньо висвітлено вибір доцільного діапазону зміни параметрів навалів лопатей робочих коліс як осьового, так і радіально-осьового типу, який має сенс розглядати при дослідженнях впливу просторового профілювання на енергетичні і пульсаційні характеристики гідротурбін.

3. У п’ятому розділі досліджуються можливості підвищення ефективності радіально-осьових насос-турбін і розширення діапазону їх надійної експлуатації в результаті застосування робочих коліс з додатковими вкороченими лопатями – сплітерами. Одна із головних переваг застосування цих робочих коліс полягає в покращенні пульсаційних характеристик в навантажувальних режимах менше номінального значення, проте результати досліджень в цьому діапазоні навантаження аналізуються лише частково.

4. В тексті роботи неодноразово наголошується на підвищенні надійності експлуатації гідротурбін внаслідок покращення енергетичних характеристик. Проте не конкретизується перелік показників надійності та їх кількісні значення, безпосередній зв'язок між характеристиками та надійністю.

5. В підрозділі роботи "Особистий внесок здобувача" (стор.45) задекларовано, що автор дисертації запроєктував серію робочих коліс радіально-осьової насос-турбіни на напори до 125 м (Канівська ГАЕС). Але проектування серії такого складного обладнання не виконується одноосібно. Мабуть доцільно зазначати про розроблення теоретичного креслення робочого колеса, або участь в проектуванні.

6. У висновках відсутня інформація щодо досягнутих кількісних показників розширення діапазону зміни навантажувальних режимів гідротурбін в результаті застосування профільних навалів.

7. Зауваження до оформлення роботи.

Викладення матеріалу загалом чітке та виважене, проте наявна незначна кількість описок та стилістичних помилок, які не змінюють змісту. Зокрема, на стор.100-104 наведено різні значення одних і тих же витрат води (Q=64,93 м3/с, Q=64,92 м3/с, Q=6493 м3/с), на стор.266 присутній повтор тексту двох абзаців, у викладенні п.7 Висновків використано стилістично хибний вислів

"...застосування негативного колового навалу в робочому колесі РК5217М2 призвело до підвищення максимального ККД в турбінному режимі..." (досліджувався вплив від'ємних та додатних значень кута профільного навалу на відповідні характеристики гідротурбіни), інше.

Зазначені зауваження мають дискусійний і рекомендаційний характер, не стосуються наукової новизни і практичної цінності, та не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

Відповідність змісту реферату основним положенням дисертаційної роботи

Ознайомлення з рефератом дає підстави стверджувати, що за структурою та змістом реферат відповідає вимогам, що ставляться МОН України до рефератів дисертаційних робіт. У тексті реферату відображено основні положення, зміст, результати і висновки здійсненого здобувачем дисертаційного дослідження. Зміст реферату та основних положень дисертації є ідентичними.

Реферат у повному обсязі розкриває основні ідеї, структуру та результати дисертаційного дослідження, надає можливість зробити належну оцінку наукової новизни та практичної цінності. Робота оформлена відповідно до академічних вимог і стандартів, вирізняється логічністю та чіткою структурою. Докторська дисертація є оригінальною і не дублює матеріали попередньої кандидатської роботи.

Повнота викладення результатів дисертаційних досліджень у опублікованих працях

Здобувачем за темою дисертації опубліковано 36 наукових праць, у тому числі 2 колективні монографії і 1 патент. 8 статей розміщено у виданнях, що індексуються міжнародною базою *Scopus*, що підтверджує вагомість наукового доробку. Ключові положення досліджень доповідалися на понад 30-ти наукових конференціях. Опубліковані матеріали в достатній мірі висвітлюють результати дисертаційного дослідження, що виносяться на захист.

Висновок

про дисертацію в цілому та відповідність її чинним вимогам

На підставі проведеного аналізу вважаю, що дисертаційна робота Хорєва Олега Миколайовича «Наукові основи покращення технічних характеристик турбомашин для гідро- та гідроакумулюючих електростанцій» є завершеним науковим дослідженням, виконаним із дотримання принципів академічної доброчесності.

В дисертації отримано нові наукові результати, спрямовані на вирішення актуальної науково-технічної проблеми покращення енергетичних і пульсаційних характеристик турбомашин різного типу для ГЕС і ГАЕС з одночасним розширенням діапазону їх експлуатації. Запропоновані методи числового і експериментального моделювання течії нестисливої в'язкої рідини враховують всі особливості робочого процесу в моделях турбомашин.

Результати і висновки дисертаційної роботи відповідають поставленим цілям і завданням. Реферат повно і коректно відображає зміст досліджень.

Тема, зміст та результати відповідають паспорту спеціальності 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки.

З урахуванням актуальності теми, високого наукового рівня проведених досліджень, наукової новизни та практичної значущості отриманих результатів, дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук» від 17.11.2021 р. №1197.

Вважаю, що **Хорєв Олег Миколайович** заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки.

Офіційний опонент,
завідувач відділу гідроенергетики
Інституту відновлюваної енергетики НАН України,
доктор технічних наук, професор Петро ВАСЬКО

Підпис професора Васька П.Ф. засвідчую.
Заступник директора з наукової роботи
Інституту відновлюваної енергетики НАН України,
член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук Микола КУЗНЄЦОВ

Інститут відновлюваної енергетики
ідентифікаційний код 26476029