ВІДГУК

офіційного опонента **Шевченка Сергія Станіславовича**
на дисертаційну роботу **Хорєва Олега Миколайовича**
«Наукові основи покращення технічних характеристик турбомашин для гідро- та гідроакумулюючих електростанцій»,
що представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки
в спеціалізовану вчену раду Д 64.180.02 ІЕМС НАН України

Актуальність теми дисертаційної роботи

Світові потреби в електроенергії постійно зростають – за даними *Energy Information Administration* в середньому на 0,8–1,0 % щороку. На цьому фоні світова енергетика переорієнтовується на екологічно безпечні відновлювані джерела, серед яких ключове місце посідає гідроенергетика.

Гідро- та гідроакумулюючі електростанції мають низку переваг, серед яких можна виділити такі: екологічність – мінімальний вплив на довкілля; економічність – виробництво дешевої енергії; висока маневреність і мобільність – здатність агрегатів миттєво реагувати на піки та спади споживання; ефективна сумісна робота з сонячними та вітровими електростанціями, генерація яких нестабільна за часом.

Сучасні турбомашини мають високий рівень ККД. Для його підвищення і розширення діапазону надійної роботи необхідно застосовувати нові методи проєктування елементів проточних частин, впроваджувати нові конструктивні рішення та ефективні методи дослідження робочого процесу. Розвиток чисельних (обчислювальна гідродинаміка, CFD) та експериментальних досліджень (лабораторні випробування моделей на гідродинамічних стендах) турбомашин для ГЕС і ГАЕС є необхідним чинником сучасної гідроенергетики. Чисельні методи дозволяють візуалізувати і аналізувати структуру потоку у всіх елементах проточних частин, виявляти зони відриву потоку, наявність вихрових структур та попередньо визначати гідравлічні втрати. Експериментальні дослідження гарантують отримання найбільш достовірних енергетичних, пульсаційних та кавітаційних характеристик турбомашин. Комплексне застосування таких методів досліджень забезпечує покращення

ВХ 159/2026
від 29.10.2026

енергетичних характеристики нових об'єктів та тих, що підлягають модернізації.

Розв'язанню цих проблем і присвячена дисертація Хорєва О.М., тому вважаю її мету і пов'язані з нею завдання досліджень актуальними.

Дисертаційна робота виконувалася в рамках держбюджетних тем НАН України:

– «Розробка та удосконалення методів математичного та фізичного моделювання просторових в'язких турбулентних течій рідини та газу в елементах проточних частин парових, газових та гідравлічних машин» (№ ДР 0109U001425);

– «Удосконалення робочих процесів в проточних частинах енергетичних машин на основі методів математичного і фізичного моделювання просторових в'язких течій рідини і газу» (№ ДР 0114U001440);

– «Моделювання та дослідження фізичних процесів в елементах енергетичних машин з метою підвищення їх ефективності та надійності» (№ ДР 0119U000655);

– «Підвищення ефективності робочих процесів та надійності елементів енергетичних машин й технологічного обладнання з використанням методів математичного і фізичного моделювання» (№ ДР 0124U000172).

Дослідження проводилися також в рамках таких науково-дослідних робіт:

– «Підвищення ефективності та збільшення потужності осьових поворотно-лопатевих гідротурбін ПЛ20, призначених для модернізації ГЕС Дніпровського каскаду» (№ ДР 0116U005054);

– «Чисельне дослідження течії рідини в проточній частині радіально-осьової гідротурбіни по проекту модернізації ГЕС Дхаліпур (Індія)» (№ ДР 0118U003633);

– «Розроблення гідродинамічних та конструктивних заходів, спрямованих на підвищення надійності та подовження ресурсу гідроагрегатів ГАЕС, що працюють у режимах часткового навантаження» (№ ДР 0121U110587).

Обґрунтованість і достовірність результатів дисертаційних досліджень

Достовірність отриманих результатів забезпечено коректними постановками задач і адекватністю математичних моделей. Запропоновані методи чисельного моделювання течії в'язкої нестисливої рідини в проточних частинах турбомашин пройшли апробацію на відомих текстових задачах. Експериментальні дослідження моделей турбомашин проведено на сертифікованому гідродинамічному стенді ЕКС-30, його вимірювальна апаратура пройшла метрологічну атестацію і відповідає вимогам ДСТУ і міжнародного енергетичного коду МЕК 60193.

Наукова новизна результатів роботи

В процесі розв'язання актуальної наукової і науково-прикладної проблеми покращення енергетичних і пульсаційних характеристик і розширення діапазону експлуатації турбомашин для ГЕС і ГАЕС було отримано такі нові наукові результати:

– 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 робочих режимів;

– 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; це дозволяє забезпечити взаємне узгодження структури потоку в елементах проточної частини та підвищити енергетичну ефективність турбіни як при проєктуванні нових, так і під час модернізації існуючих об'єктів;

– 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, що забезпечують розширення діапазону експлуатації та підвищення ефективності турбомашин (зокрема, на прикладі насос-турбіни Дністровської ГАЕС);

– 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 до рівня нижче 8 % та забезпечити стабільну роботу насос-турбіни в зоні часткових навантажень;

– 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; це дозволило забезпечити цілеспрямоване обмеження впливу вихрового джгута на режимах часткового навантаження та знизити значення амплітуд пульсацій тиску на таких режимах до 50 % (залежно від витрати);

– вперше на основі комплексних 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.

– набув подальшого розвитку метод проєктування робочих коліс радіально-осьових турбомашин шляхом додавання встановлених зв'язків між просторовою формою лопатевих систем та енергетичними характеристиками.

На відміну від існуючих, метод базується на додатковому врахуванні геометричних параметрів: величин навалів, кількості лопатей, конфігурації вхідних і вихідних кромок, що дозволяє ще на стадії розроблення цілеспрямовано покращувати характеристики турбомашин у розширеному діапазоні експлуатації.

Вважаю, що отримані під час досліджень нові наукові результати актуальні, мають високий рівень і є обґрунтованою основою подальшого розвитку теорії турбомашин для ГЕС і ГАЕС

Практичне значення результатів дисертаційних досліджень

Практична значущість отриманих результатів полягає у їхньому застосуванні для вдосконалення процесів проєктування нових та модернізації існуючих турбомашин. Впровадження розроблених рішень сприятиме покращенню технічних характеристик турбін і насос-турбін, що значно покращить ефективність роботи ГЕС і ГАЕС. Можна виділити таке:

– детальними дослідженнями робочого процесу в проточних частинах осьових і радіально-осьових турбін обґрунтовано можливість і доцільність заміни коштовних експериментальних досліджень моделей на гідрокавітаційних стендах на чисельні, що суттєво зменшує терміни і вартість проєктувальних робіт;

– доведено перспективність і переваги застосування робочих коліс насос-турбін підвищеної швидкохідності зі збільшеною кількістю лопатей суттєво просторової форми, запропоновано для впровадження високоефективну проточну частину насос-турбіни на напори 80–125 м;

– запропоновано і доведено до інженерної реалізації універсальний метод просторового профілювання лопатей осьових і радіально-осьових робочих коліс за допомогою різних видів навалів; дозволяє підвищити якість проєктування та ефективність проточних частин турбомашин для ГЕС і ГАЕС;

– встановлені закономірності впливу колових навалів лопатей робочих коліс радіально-осьових насос-турбін на пульсаційні та енергетичні характеристики в широкому діапазоні режимів експлуатації є науково

обґрунтованою основою подальшого удосконалювання проточних частин при проєктуванні нових і модернізації існуючих турбомашин для ГАЕС;

– отримані в експериментальний спосіб залежності впливу встановлення вирівнювальних ребер у дифузор відсмоктувальної труби радіально-осьової насос-турбіни на вид амплітудно-частотних спектрів є обґрунтуванням можливості цілеспрямованого зменшення впливу вихрового джгута і розширення діапазону надійної роботи агрегатів в зону часткових навантажень;

Одним з головних показників практичного значення результатів дисертаційних досліджень є їх впровадження в проєкти реконструкції ГЕС Дніпровського каскаду (за ці роботи дисертанту Хорєву О.М. було присуджено найвищу державну нагороду в галузі науки і техніки – звання лауреата Національної премії України імені Бориса Патона), а також в проєкт 5–7 агрегатів найпотужнішої акумулюючої станції Європи – Дністровської ГАЕС (в рамках господарчого договору з АТ «Українські енергетичні машини»).

Зміст дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Хорєва О.М. складається з анотації, вступу, переліку скорочень і умовних позначень, шести розділів, переліку літературних джерел, висновків і додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми, окреслено її зв'язок із науковими програмами, а також визначено мету, завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження. Крім того, висвітлено наукову новизну та практичну цінність роботи, подано інформацію про апробацію результатів і розкрито особистий внесок автора у роботи, виконані у співавторстві.

У розділі 1 роботи проаналізовано актуальний стан та роль ГЕС і ГАЕС в енергосистемах як у світі, так і України (на початок війни). Визначено основні підходи до проєктування нових і модернізації існуючих турбомашин, що дозволяють розширити діапазон їхньої ефективної експлуатації. Проведено огляд публікацій з чисельних та експериментальних досліджень робочого процесу в моделях турбін. Підкреслено, що ключовим чинником, який обмежує роботу турбін на часткових режимах, є виникнення вихрового джгута за

робочим колесом. Розглянуто способи зменшення його негативного впливу. Обґрунтовано, що найбільш перспективними методами покращення технічних параметрів турбін є просторове профілювання лопатей робочих коліс та впровадження інноваційних конструктивних рішень при проєктування проточної частини турбомашин.

У розділі 2 детально описано науковий апарат, використаний для вивчення гідродинамічних процесів у проточних частинах турбомашин. Для моделювання течії в'язкої нестисливої рідини використано осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса з додатковим членом, що містить штучну стисливість. Для аналізу турбулентних ефектів застосовано двопараметричну модель Ментера (*SST*). Математичні моделі, алгоритми і чисельні методи розрахунків течії нестисливої в'язкої рідини реалізовано в програмному комплексі *IPMFlow*. Запропоновані методи пройшли апробацію, їх точність підтверджена зіставленням із результатами відомих експериментів.

Експериментальні дослідження моделей насос-турбін з діаметром робочого колеса 350 мм проведено на гідродинамічному стенді ЕКС-30, параметри якого повністю відповідають вимогам ДСТУ та міжнародного стандарту МЕК 60193.

У розділі 3 наведено результати розробки теоретичних основ покращення характеристик осьових поворотно-лопатевих турбін. З цією метою запропоновано метод просторового профілювання лопатей за допомогою навалів різних конфігурацій. На основі детального чисельного моделювання робочого процесу досліджено вплив простих і складних, осьових і колових, втулкових та периферійних навалів на структуру потоку в робочому колесі та відсмоктувальній трубі. Оцінено вплив цих типів навалів на інтегральний ККД розрахункової області та локальні кавітаційні показники. З використанням комбінованих периферійних навалів розроблено нове робоче колесо, яке доцільно впровадити при реконструкції ГЕС Дніпровського каскаду.

Розділ 4 присвячено науковому обґрунтуванню перспективності впровадження швидкохідних робочих коліс для насос-турбін, що працюють у

діапазоні напорів 80–125 м. Основною конструктивною особливістю таких коліс є збільшена кількість лопатей складної просторової форми та збільшена висота напрямного апарату, що сприяє покращенню структури течії і енергетичних характеристик, а також розширенню діапазону надійної роботи в турбінному режимі. Порівняльний аналіз, що базується на результатах чисельного моделювання робочого процесу та модельних досліджень на гідродинамічному стенді, засвідчив вищу ефективність швидкохідних моделей порівняно з традиційними конструкціями.

У розділі 5 науково обґрунтовано, що застосування сплітерних робочих коліс дозволяє покращити технічні характеристики радіально-осьових насос-турбін. Автором за допомогою комплексних досліджень: чисельного моделювання (за допомогою програми *IPMFlow*) та експериментальних випробувань на стенді ЕКС-30 проаналізовано вплив геометричних параметрів лопатей на структуру потоку та енергетичні показники моделі в турбінному і насосному режимах. Результатом дослідження стала розробка нового вдосконаленого робочого колеса (6 основних та 6 додаткових вкорочених лопатей), яке демонструє вищу ефективність, особливо при часткових навантаженнях.

Розділ 6 присвячено створенню наукових основ удосконалення моделей радіально-осьових насос-турбін. Досліджено вплив просторового профілювання лопатей робочих коліс за допомогою колових навалів на структуру течії, ККД проточної частини та вид амплітудно-частотних спектрів у відсмоктувальній трубі в обох режимах роботи. Експериментально обґрунтовано ефективність застосування вирівнювальних ребер у дифузорі. Це рішення дозволило суттєво зменшити негативний вплив вихрового джгута під час роботи в генераторному режимі при часткових навантаженнях. Завдяки поєднанню чисельних досліджень та лабораторних випробувань на стенді ЕКС-30 вдалося встановити взаємозв'язки між геометричними параметрами робочих коліс та енергетичною ефективністю в турбінному і насосному режимах. Результатом цієї роботи

стало створення нового проєкту робочого колеса, яке планується впровадити на Дністровській ГАЕС.

Зауваження до дисертаційної роботи:

1. Можливо було б доцільно провести тестові розрахунки проточних частин осьової і радіально-осьової турбіни не тільки з використанням моделі турбулентності Ментера *SST*, але й з іншими моделями, опис яких наведено у Розділі 2, та провести порівняння отриманих результатів.

2. Не обґрунтовано вибір методу проєктування сплітерних робочих коліс. Можливо мав би сенс проєктувати такі лопаті не вкороченням з боку всмоктувальної кромки, а за спеціальними новими методиками, що враховують відстані в світу між сплітером і сусідніми основними лопатями.

3. При дослідженні впливу встановлення вирівнювальних ребер в дифузор відсмоктувальної труби на енергетичні і пульсаційні характеристики можливо варто було б дослідити вплив не тільки їх довжини, але й кількості і форми.

4. В роботі відсутні результати дослідження впливу геометричних параметрів робочих коліс (в першу чергу кількості лопатей) насос-турбін на пульсаційні характеристики.

5. В тексті роботи є деякі незначні граматичні помилки, а також технічні неточності. Наприклад, витрата в 3 розділі вимірюється в л/с, а в 4–6 в $м^3/с$.

Вказані недоліки не стосуються рівня наукової новизни, практичної цінності роботи і висновків за роботою та не впливають на загальну позитивну оцінку.

Відповідність змісту автореферату положенням дисертаційної роботи

Автореферат повністю розкриває основні результати, структуру та результати дисертаційного дослідження, його зміст дає можливість належно оцінити наукову новизну та практичну цінність. Робота оформлена відповідно до академічних вимог, є логічною та чітко структурованою. Докторська дисертація є оригінальною, не використовує матеріали та результати кандидатської роботи.

Повнота викладення результатів дисертаційних досліджень у опублікованих роботах

Результати дисертаційної роботи оприлюднено у 36 публікаціях, з них 2 монографії, 26 у фахових виданнях, 1 патент, 7 робіт апробаційного характеру. З 36 наведених публікацій 8 статей розміщено у виданнях, що індексуються міжнародною базою Scopus. Матеріали досліджень доповідалися на понад 30 наукових конференціях, де отримали позитивні оцінки фахівців.

Загальні висновки по дисертації

Вважаю, що дисертаційна робота Хорєва Олега Миколайовича «Наукові основи покращення технічних характеристик турбомашин для гідро- та гідроакумулюючих електростанцій» є завершеним науковим дослідженням.

У дисертаційній роботі розв'язано важливу науково-технічну проблему підвищення енергетичної ефективності та розширення діапазону надійної експлуатації турбомашин шляхом застосування просторового профілювання лопатей робочих коліс та розроблення і впровадження нових конструктивних рішень. Методи чисельного і експериментального моделювання течії нестисливої в'язкої рідини в моделях турбомашин, що були задіяні в дисертації, відповідають сучасному світовому рівню.

Всі отримані в роботі результати і висновки відповідають поставленим цілям і завданням. Автореферат достатньо повно висвітлює зміст дисертації.

Висновок Комісії ІЕМС з питань академічної доброчесності засвідчує самостійний характер роботи та відсутність плагіату.

Назва роботи, її мета, завдання, наукова новизна і практичне значення, результати і висновки відповідають паспорту спеціальності 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки.

Вважаю, що актуальність теми і поставлених та розв'язаних у роботі завдань, високий науковий рівень досліджень, значуща наукова новизна та безперечне практичне значення отриманих результатів дисертаційної роботи відповідають усім 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:

Провідний науковий співробітник
відділу моделювання енергетичних
процесів і систем
Інституту проблем моделювання
в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України,
доктор технічних наук, старший дослідник Сергій ШЕВЧЕНКО

Особистий підпис д.т.н. С.С. Шевченка підтверджую

Вчений секретар
Інституту проблем моделювання
в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України
кандидат технічних наук,
старший дослідник Вікторія ЧЬОЧЬ

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МОДЕЛЮВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ ім. Г.Є. Пухова
Ідентифікаційний код 05516949
м. Київ