ВІДГУК

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

1. Актуальність обраної теми, її зв'язок з науковими державними й галузевими програмами.

Гідроелектростанції відіграють важливу роль у забезпеченні стабільної роботи енергетичних систем у всьому світі: вони є невід'ємною частиною глобального переходу до відновлюваних джерел енергії. Такі електростанції України мають стратегічне значення для національної енергетичної системи, адже мобільно забезпечують її балансуючими потужностями, особливо під час пікових навантажень, коли потреба в електроенергії різко зростає. У воєнний час стабільність енергосистем є питанням як національної безпеки, так і забезпечення життєдіяльності кожного українця, тобто роль гідроенергетичних об'єктів сьогодні є надважливою.

Енергетичні показники сучасних турбін і насос-турбін є високими. Щоб підвищити їх ефективність необхідно застосовувати нові наукоємні підходи до проєктування і дослідження робочих процесів в моделях проточних частин, в першу чергу в робочому колесі. Незважаючи на наявність значної кількості гідродинамічних закономірностей турбін для ГЕС і ГАЕС, кожна нова проточна частина має свої індивідуальні відмінності, які можуть істотно впливати на її характеристики. На сьогоднішній день основним методом дослідження турбін для ГЕС і ГАЕС є фізичний експеримент на спеціалізованих гідродинамічних стендах. Підвищення значення чисельного експерименту сталося завдяки розробці і удосконаленню математичних моделей течії в'язкої стисливої і нестисливої рідини, гідродинамічних методів проєктування турбін, а також обчислювальних методів, алгоритмів і програм. Основними перевагами обчислювальних методів порівняно з експериментом є істотно менші фінансові, трудові та часові витрати, а також більш висока інформативність результатів. При проєктуванні нових турбін і модернізації існуючих крім вимог підняття рівня максимального і середньозваженого коефіцієнту корисної дії, а також потужності, практично завжди постає питання розширення діапазону надійної експлуатації агрегатів в зону часткових навантажень. При роботі в таких умовах за робочим колесом утворюються вихрові джгути, які можуть стати причиною виникнення пульсацій тиску у відсмоктувальній трубі, що в свою чергу призводить до вібрацій всього агрегату і зниження ефективності роботи. Тому розвиток теорії і практики дослідження турбомашин для ГЕС і ГАЕС, покращення їх технічних характеристик і розширення діапазону надійної експлуатації є актуальною темою.

Актуальність теми підтверджується й тим, що вона пов'язана з виконанням держбюджетних тем НАН України та науково-дослідних робіт, в яких Хорєв О.М. був відповідальним виконавцем і виконавцем окремих розділів:

- «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);

Вх 168/2026
від 01.11.2026р

- «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).

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації.

Дисертаційна робота Хорєва Олега Миколайовича на тему «Наукові основи покращення технічних характеристик турбомашин для гідро- та гідроакумулюючих електростанцій», обсяг якої 337 сторінок, складається зі вступу, основної частини з шести розділів, загальних висновків по роботі, списку використаних джерел та додатків. Дисертація містить 184 рисунки за текстом; 6 рисунків на 6 окремих сторінках; 18 таблиць за текстом; 2 таблиці на 2 окремих сторінках; 251 найменування використаних джерел на 27 сторінках; 2 додатки на 10 сторінках.

Мета дисертаційної роботи визначена чітко, відображає науковий підхід до проблеми і орієнтована на вдосконалення існуючих підходів до дослідження турбін для ГЕС і ГАЕС. Завдання дослідження відповідають меті, висвітлюють складові її досягнення.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і завдання досліджень, наведено наукову новизну і практичне значення досліджень, дані про апробацію і особовий внесок дисертанта у роботи, що написані у співавторстві.

У першому розділі розглянуто сучасний стан проблеми вдосконалення проточних частин турбомашин для ГЕС і ГАЕС. Визначено і проаналізовано основні шляхи вирішення цієї проблеми як в розрахунковий, так і експериментальний спосіб. Визначено, що головними напрямами є просторове профілювання елементів проточних частин, в першу чергу робочого колеса, та застосування нових перспективних конструктивних рішень. Проведено огляд сучасних робіт науковців зарубіжжя та України з чисельного і експериментального дослідження робочого процесу в моделях турбомашин різного типу.

У другому розділі наведено опис застосованих в роботі методів моделювання робочого процесу в проточних частинах турбомашин. Чисельне моделювання течії нестисливої в'язкої рідини виконано на основі чисельного інтегрування осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса з додатковим членом, що містить штучну стисливість. Математичні моделі, алгоритми і чисельні методи реалізовано в програмному комплексі *IPMFlow* (розробка ІЕМС). Проведено апробацію методів шляхом дослідження течії в моделях осьової і радіально-осьової турбіни. Фізичне моделювання робочого процесу в моделях турбомашин в роботі проведено на гідродинамічному стенді ЕКС-30, показники якого відповідають вимогам міжнародного коду МЕК 60193.

У третьому розділі поставлено і вирішено задачу підвищення ефективності осьових турбін для ГЕС шляхом просторового профілювання лопатей робочих коліс за допомогою навалів і чисельного дослідження робочого процесу в них. Встановлено закономірності впливу простих, складних осьових і колових навалів, периферійних і втулкових лопатей робочих коліс на структуру потоку, енергетичні та кавітаційні характеристики. Чисельні дослідження впливу комбінованого периферійного навалу (одночасно осьового та колового) дозволили розробити нове робоче колесо для впровадження на ГЕС Дніпровського каскаду.

У четвертому розділі дисертації з метою підвищення ефективності і розширення діапазону експлуатації науково обґрунтовано перспективність застосування швидкохідних робочих коліс насос-турбін на напори 80–125 м зі збільшеною кількістю лопатей суттєво

просторової форми. Проведені в чисельний і експериментальний спосіб селективні дослідження робочого процесу в моделях швидкохідного і традиційного варіантів робочих коліс довели перевагу першого як у турбінному, так і насосному режимах та дозволили розширити діапазон ефективної надійної експлуатації.

У п'ятому розділі обґрунтовано можливість підвищення ефективності радіально-осьових насос-турбін і розширення діапазону їх експлуатації за допомогою застосування сплітерних робочих коліс. В чисельний і експериментальний спосіб встановлено вплив геометричних параметрів сплітерних лопатей на структуру течії і енергетичні показники в турбінному і насосному режимах. На основі встановлених залежностей було спроєктовано нове робоче колесо з підвищеними енергетичними показниками, в тому числі при роботі на режимах часткового навантаження.

У шостому розділі для покращення технічних характеристик насос-турбін ГАЕС досліджено вплив просторового профілювання лопатей робочих коліс за допомогою колових навалів лопатей на структуру течії, енергетичні і пульсаційні характеристики насос-турбін. Отримано залежності структури потоку та енергетичних і пульсаційних характеристик від величин навалів в турбінному і насосному режимах. В експериментальний спосіб доведено, що встановлення стабілізуючих вирівнювальних ребер в дифузор відсмоктувальної труби моделі насос-турбіни забезпечує зниження впливу вихрового джгута на режимах часткового навантаження та суттєво знижує значення амплітуд пульсацій тиску.

В чисельний та експериментальний спосіб встановлено закономірності впливу геометричних параметрів робочих коліс насос-турбін на енергетичні характеристики, на основі яких розроблено модель насос-турбіни для впровадження на Дністровській ГАЕС.

В цілому розглянута та проаналізована дисертаційна робота Хорєва Олега Миколайовича є завершеною науково-дослідною працею, що спрямована на вирішення актуальної проблеми науково обґрунтованих основ покращення енергетичних характеристик і розширення діапазону роботи турбомашин для ГЕС і ГАЕС в зону часткових навантажень за допомогою сучасних методів проєктування і дослідження робочого процесу в проточних частинах. Мета та задачі, що поставлені у дисертаційній роботі вирішені у повному обсязі. Актуальність та практична цінність роботи підтверджуються тим, щорезультати дисертаційних досліджень впроваджено в АТ «Українські енергетичні машини» при модернізації турбін Кременчуцької ГЕС і при проєктуванні гідроагрегатів № 5–7 Дністровської ГАЕС, а також в ТОВ «Харківтурбоінжинірінг» при розробці проєкту ГЕС Дхаліпур (Індія).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації базується:

- на аналізі літературних джерел по даній проблемі, на коректній постановці мети і задач дослідження;
- на правильному формулюванні отриманих висновків. Викладені у дисертаційній роботі наукові положення, обґрунтовані висновки і надані рекомендації є наслідком кваліфікованих наукових досліджень, що проведені автором при виконанні завдань, які сформульовані в роботі;
- на використанні сучасних методів дослідження, програмних продуктів та математичного апарату;
- на співставленні отриманих результатів з результатами інших дослідників;
- на загальноприйнятих допущеннях і обмеженнях, що є досить правомірними та забезпечують повторювальність результатів з достатньою точністю;
- на узагальненні існуючих рішень щодо вирішення проблеми енергозбереження шляхом побудови певної послідовності прийняття рішень (ієрархічної структури). У дисертаційній роботі обґрунтовано доцільність врахування фактичних режимів експлуатації вихідного устаткування при утилізації ВЕР при реалізації турбінних

циклів, що дасть можливість більш раціонально використовувати паливно-енергетичні ресурси.

3. Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, наукова новизна результатів дослідження.

Достовірність отриманих наукових результатів роботи забезпечувалась коректною постановкою задач, коректним застосуванням математичного апарату для вирішення поставлених наукових задач та підтверджувалась узгодженням результатів розрахункових досліджень з результатами експериментальних досліджень та досліджень інших авторів, виконаних за апробованими методиками, відповідністю математичних моделей фізичній природі робочих процесів в проточних частинах турбомашин. Достовірність результатів експериментальних досліджень підтверджується відповідністю показників стенда ЕКС-30 вимогам міжнародного стандарту МЕК 60193. Стенд пройшов метрологічну атестацію, сертифікати наявні.

Наукова новизна отриманих результатів та висновків полягає в тому, що вирішено важливу науково-технічну проблему, що пов'язана з покращенням енергетичних і пульсаційних характеристик і розширення діапазону експлуатації турбін різного типу для ГЕС і ГАЕС шляхом гідродинамічного удосконалення ПЧ на основі сучасних експериментальних і чисельних методів. До нових наукових результатів можна віднести таке:

– 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 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.

4. Рекомендації з використання та практична значимість отриманих результатів дослідження.

Практична значимість отриманих результатів дослідження полягає в тому, що доведено можливість часткової заміни дорогих експериментальних досліджень моделей турбін на гідродинамічних стендах на чисельні з урахуванням особливостей течії у всіх елементах проточних частин, що дозволяє суттєво знизити терміни і вартість проєктувальних робіт.

Здобувачем доведено можливість часткової заміни коштовних експериментальних досліджень моделей турбомашин на гідродинамічних стендах на чисельні, що дозволяє суттєво знизити терміни і вартість проєктувальних робіт. Обґрунтовано перспективність застосування робочих коліс зі збільшеною кількістю лопатей суттєво просторової форми для насос-турбін ГАЕС на напори 80–125 м. Запропонований здобувачем універсальний метод просторового профілювання лопатей осьових і радіально-осьових робочих коліс, заснований на застосуванні різних видів навалів, дозволяє підвищити якість проєктування та ефективність проточних частин турбомашин. Встановлені в роботі закономірності впливу навалів лопатей робочих коліс на пульсаційні та енергетичні характеристики в широкому діапазоні режимних параметрів є науково обґрунтованою основою подальшого удосконалювання проточних частин при проєктуванні нових і модернізації існуючих турбомашин для ГЕС і ГАЕС. Отримані Хорєвим О.М. залежності впливу встановлення вирівнювальних ребер у дифузор відсмоктувальної труби радіально-осьової насос-турбіни на інтенсивність вихрового джгута і рівень пульсацій тиску є обґрунтуванням можливості розширення діапазону надійної роботи агрегатів в зону часткових навантажень. Розроблено нові високоефективні робочі колеса насос-турбін для Дністровської і Канівської ГАЕС, будівництво яких у найближчі часи передбачено програмами Енергетичної стратегії України.

Результати дисертаційних досліджень впроваджено в АТ «Українські енергетичні машини» при модернізації турбін Кременчуцької ГЕС і при проєктуванні гідроагрегатів № 5–7 Дністровської ГАЕС, а також в ТОВ «Харківтурбоінжинірінг» при розробці проєкту ГЕС Дхаліпур (Індія).

Наукові і практичні результати дисертаційної роботи здобувача отримали високу оцінку науково-технічної спільноти України: у 2021 р. за роботу «Створення високоекономічних гідроагрегатів для ГЕС України» Хорєву О.М. у співавторстві з представниками провідних підприємств енергетичної сфери Указом Президента України присуджено звання лауреата Національної премії України імені Бориса Патона.

5. Повнота викладу матеріалів дисертації в опублікованих працях

В опублікованих працях здобувача достатньо повно викладені основні результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертаційної роботи. Основні положення, результати та висновки дисертаційної роботи оприлюднено у 36 наукових працях, з них у двох монографіях, 26 статтях у фахових наукових виданнях (в тому числі 3 у міжнародних наукометричних базах Scopus), 6 у доповідях та тезах доповідей в збірниках матеріалів конференцій, з них 5 внесено до наукометричної бази Scopus, 1 стаття у фаховому журналі, патент на корисну модель, що свідчить про високу наукову значущість отриманих результатів.

Основні положення і результати досліджень за темою дисертації доповідались, обговорювались і одержали позитивну оцінку на більш ніж 30 наукових конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2010–2020, 2023–2026 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Удосконалювання турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання» (м. Харків, 2009, 2012, 2015, 2017, 2019); «Физико технические проблемы энергетикии пути их решения 2011» (Харків, ФТПЭПР 2011), XVI, XXI Міжнародному конгресі двигунобудівників (Рибачє, Коблево, 2011, 2016 р.); XXII

Міжнародна науково-практична конференція «Фізичні і комп'ютерні технології» (м. Харків, 2016 р.), «Актуальні проблеми інженерної механіки» (м. Одеса, 2020), Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering-Synergetic Engineering (Kharkiv, 2020); International Conference on Advanced Mechanical and Power Engineering (Kharkiv, CAMPE-2021, 2023, 2025); IEEE KhPI Week on Advanced Technology, Kharkiv, 3–7 October, 2022.

Рівень та кількість публікацій, а також апробація матеріалів дисертаційної роботи на міжнародних наукових та науково-технічних конференціях відповідають вимогам, що пред'являються до докторських дисертацій атестаційною колегією Міністерства освіти і науки України.

Дисертація і реферат написані відповідно до вимог к науково-технічним текстам. Зміст реферату повністю відображає основні положення дисертаційної роботи, відповідає структурі її розділів та містить головні результати досліджень. Це дозволяє об'єктивно оцінити наукову новизну і практичне значення отриманих в роботі результатів. Стиль викладення матеріалів у дисертації та рефераті відповідає загальноприйнятим академічним вимогам, а зміст роботи є чітко структурованим та логічно узгодженим.

Докторська дисертація не містить матеріалів, що були викладені у кандидатській дисертації здобувача. Перевірка роботи на відсутність плагіату, за висновком Комісії з питань академічної доброчесності ІЕМС, довела оригінальність досліджень та їх самостійний характер.

6. Дискусійні положення та зауваження по дисертаційній роботі і реферату.

1. В роботі відсутні результати кавітаційних досліджень моделей насос-турбін в насосному режимі, або не повідомлено чи проводилися вони.

2. Не вказано діапазон швидкохідностей або напорів насос-турбін, при яких застосування робочих зі сплітером є ефективним.

3. В роботі доведено, що довжина вирівнювальних ребер у відсмоктувальній трубі практично не впливає на величини пульсацій тиску. Але, по-перше, не обґрунтовано вибір довжин досліджуваних ребер, по-друге, не визначено мінімальну довжину ребер, яка забезпечить потрібні показники.

4. Не обґрунтовано вибір величини колового навалу лопатей -30° при дослідженні впливу геометричних параметрів робочих коліс насос-турбін на структуру течії і енергетичні характеристики.

5. В тексті дисертації мають місце незначні граматичні і пунктаційні помилки, але їх кількість незначна і не впливає на якість дисертації в цілому

Зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи, яка є завершеним науково-практичним дослідженням.

7. Висновок про відповідність дисертаційної роботи вимогам «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук» від 17.11.2021 р. №1197.

В цілому можна констатувати, що рецензована робота є закінченим науковим дослідженням, в якому отримані нові науково обґрунтовані результати, які є важливими для розвитку енергозберігаючих технологій на основі впровадження турбінних циклів. Дисертаційна робота по змісту відповідає паспорту спеціальності 05.05.16 – турбомашини і турбоустановки. Дисертаційна робота і реферат оформлені з дотриманням вимог, встановлених МОН до дисертації.

Зважаючи на актуальність теми досліджень, ступінь обґрунтованості наукових результатів дисертаційної роботи, новизну та повноту викладу результатів в опублікованих працях автора, вважаю, що дисертація «Наукові основи покращення технічних характеристик турбомашин для гідро- та гідроакумулюючих електростанцій» є завершеною науковою працею. Вона містить нові наукові результати, що спрямовані на

розв'язання важливої науково-технічної проблеми підвищення ефективності турбомашин і розширення діапазону їх безпечної експлуатації на режимах часткового навантаження на основі застосування методів просторового профілювання робочих коліс різного типу та сучасних методів чисельного і експериментального дослідження робочого процесу в проточних частинах. Результати дисертаційної роботи відповідають меті і поставленим завданням. Реферат повністю відображає основний зміст роботи. Тема, зміст та результати дисертаційної роботи відповідають паспорту спеціальності 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки.

Дисертаційна робота виконана із дотриманням принципів академічної доброчесності та відповідає вимогам пунктів 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук» від 17.11.2021 р. №1197, а її автор, Хорєв Олег Миколайович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
в.о. директора навчально-наукового інституту
атомної та теплової енергетики
Національного технічного
університету України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Ольга ЧЕРНОУСЕНКО

Підпис гр. Ольги ЧЕРНОУСЕНКО
ЗАСВІДЧУЮ
Відділ кадрів та діловодства
підпис (Чурило) пр-ще

Підпис д.т.н., проф. Черноусенко О.Ю. засвідчую
Вчений секретар
Національного технічного університету
України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського» Валерія ХОЛЯВКО

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ • Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" • ідентифікаційний код 02070821