Голові спеціалізованої вченої ради Д 64.180.02
Інституту проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного НАН України

61046, м. Харків, вул. Дм. Пожарського, 2/10

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Косьянової Анни Ігорівни
«Підвищення ефективності регулюючого відсіку парової турбіни великої потужності»,
подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки

1. Актуальність теми дисертаційної роботи та її відповідність планам наукових досліджень

Наразі сучасний стан електрогенеруючих підприємств України потребує суттєвого оновлення та модернізації парку парових турбін великої потужності. При цьому важливим є розв'язання актуальних задач підвищення ефективності та економічності парових турбін з урахуванням збільшення тривалості роботи великих теплових електростанцій на знижених навантаженнях (часткових режимах). Розповсюджені блоки теплових електростанцій України потужністю 200 – 500 МВт найчастіше використовують системи соплового паророзподілу з коловою нерівномірністю потоку. На часткових режимах роботи регулюючі відсіки такого типу мають підвищену колову нерівномірність тиску та температури, збільшені нестаціонарні термогазодинамічні навантаження на елементи конструкції, що призводить до зниження їх газодинамічної ефективності та ресурсу. Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливих актуальних науково-практичних задач, що пов'язані з удосконаленням чисельної моделі нестаціонарної просторової турбулентної течії пари й

розробкою принципово нових підходів підвищення газодинамічної ефективності регулюючого відсіку парових турбін великої потужності.

Дисертаційна робота пов'язана з науковими програмами, планами і темами, які виконувались у відділі гідроаеромеханіки енергетичних машин Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України в період з 2009 по 2019 рр. відповідно до бюджетних тем «Розробка ефективних проточних частин паротурбінних установок підвищеної маневреності» (№ ДР 0110U006342), «Розробка та удосконалення методів математичного і фізичного моделювання в'язких турбулентних течій рідини і газу в елементах проточних частин парових, газових та гідравлічних турбін» (№ ДР 0110U006342), «Удосконалення робочих процесів в проточних частинах енергетичних машин на основі методів математичного і фізичного моделювання просторових в'язких течій рідини і газу» (№ ДР 0114U001440) та «Розробка системи соплового регулювання нового типу для парових турбін серії К-300 з метою підвищення їх економічності та надійності» (№ ДР 0119U101231), в яких здобувачка виконувала роботу як виконавець окремих розділів.

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

Основні наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи достатньо обґрунтовані виконаними розрахунковими дослідженнями, проведеними здобувачкою особисто.

Достовірність і обґрунтованість наукових положень та висновків, що захищаються, базується на: докладному аналізі літературних джерел за тематикою роботи, коректній постановці мети та задач дослідження; вірному використанні сучасних методів математичного моделювання, фундаментальних положень теоретичної та обчислювальної газогідродинаміки; співставленні отриманих здобувачкою результатів з відомими результатами інших авторів.

3. Основні наукові результати досліджень та наукова новизна дисертації

Одержано нові наукові результати, перевага яких перед існуючими полягає у наступному:

– розвинуто чисельну модель просторової в'язкої нестаціонарної течії стисливої пари, в якій, на відміну від існуючої, реалізовано можливість наближеного врахування нестаціонарних ефектів, що дозволяє суттєво скоротити обчислювальні ресурси;

– вперше запропоновано підхід до організації парціального пароподілу для забезпечення регулювання режимів роботи парових турбін великої потужності, що, на відміну від існуючих підходів, використовує підвід пари з парціальністю в радіальному напрямку через кільцеві соплові блоки;

– вперше встановлено основні закономірності впливу радіального пароподілу на структуру потоку та газодинамічні характеристики регулюючого відсіку ЦВТ в широкому діапазоні режимів роботи парової турбіни;

– набув подальшого розвитку підхід до проектування регулюючих відсіків з коловим сопловим пароподілом, що, на відміну від існуючих підходів, спирається на відмову від камери вирівнювання, зменшення навантаження регулюючого ступеня та використання проміжного ступеня, а також на використання ступенів діагонального типу.

4. Наукове, практичне значення та реалізація результатів роботи

Наукове значення роботи пов'язано з тим, що одержані результати є науково-методичною складовою в проектуванні регулюючих відсіків нових та перспективних парових турбін великої потужності.

Практичне значення отриманих результатів пов'язано з підвищенням газодинамічної ефективності проточної частини циліндру високого тиску парових турбін великої потужності за рахунок використання нових підходів до побудови регулюючого відсіку. Результати дисертаційної роботи використані

при виборі напрямків підвищення газодинамічної ефективності проточної частини регулюючого відсіку та перших ступенів ЦВТ парової турбіни К-325-23,5 (м. Харків, Україна, акт впровадження ТА-02-221), а також в учбовому процесі на кафедрі теплоенергетики та енергозберігаючих технологій Української інженерно-педагогічної академії (м. Харків, Україна).

5. Повнота викладу наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях

За темою дисертації опубліковано 15 наукових робіт, у тому числі 1 монографія, 7 статей у фахових наукових журналах та збірниках наукових праць (з яких 1 – в журналі, індексованому в наукометричній базі Scopus), 6 тез та матеріалів доповідей на наукових конференціях (включаючи міжнародні), 1 патент України на корисну модель.

Аналіз публікацій здобувачки дозволяє зробити висновок, що основні результати дисертації знайшли повне відображення в авторефераті та наукових фахових виданнях. Автореферат дисертації повною мірою відображає зміст роботи та отримані здобувачкою результати досліджень. Робота пройшла апробацію на спеціалізованих наукових конференціях та семінарах.

6. Оцінка змісту дисертації та її завершеності у цілому

Дисертація являє собою рукопис, загальним обсягом 188 сторінок, у тому числі 136 сторінок основного тексту. Дисертація складається зі вступу, основної частини з 4 розділів, висновків, списку використаних джерел із 122 найменувань та додатків. Дисертаційна робота та автореферат написані згідно вимог до сучасних науково-технічних текстів, висновки по роботі відображають усі отримані здобувачкою результати. В тексті дисертації наведено значну кількість графічного матеріалу, що наглядно представляє отримані здобувачкою результати досліджень. Текст автореферату повністю відповідає змісту представленої до захисту дисертаційної роботи. Зміст

дисертації відповідає паспорту спеціальності 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Також визначено мету й задачі дослідження, вказано об'єкт та предмет дослідження, наведено методи дослідження, визначено наукову новизну здобутих результатів, їх теоретичне та практичне значення. Представлені відомості про апробацію, а також список публікацій у фахових наукових виданнях.

В **першому розділі** виконано огляд літератури за темою дисертаційної роботи та обґрунтовано вибір напряму досліджень. Розглянуто існуючі підходи підвищення газодинамічної ефективності регулюючих відсіків парових турбін на часткових режимах роботи. Наразі найбільш розповсюдженим є використання системи соплового пароросподілу з коловою парціальністю. Для вирівнювання колової нерівномірності, що заздалегідь внесена в потік системою пароросподілу, використовується вирівнююча камера.

Зазначено, що істотного поліпшення ефективності роботи турбіни на номінальному режимі та забезпечення незначної колової нерівномірності на часткових режимах можливо досягти при використанні принципово нових способів пароросподілу. Сформульовано актуальні напрями підвищення газодинамічної ефективності регулюючих відсіків парових турбін з існуючими системами пароросподілу.

Здобувачкою обґрунтовано та обрано чисельний експеримент як основний метод досліджень, а також визначено напрям розвитку чисельної моделі, пов'язаний із скороченням витрат обчислювальних ресурсів та забезпеченням достатньої точності при розв'язанні задачі в нестаціонарній постановці. Наведено методику проектування проточних частин парових турбін, що складається як з методів газодинамічного розрахунку різних рівнів складності, так і з методів побудови просторової форми проточної частини на основі обмеженої кількості параметризованих величин.

В **другому розділі** наведено метод проектування проточних частин парових турбін осьового типу, що складається з методу розрахунку тривимірної нестаціонарної в'язкої турбулентної течії стисливої перегрітої пари та аналітичного методу побудови просторової форми проточної частини на основі обмеженої кількості параметризованих величин.

В **третьому розділі** наведено результати чисельного дослідження просторової турбулентної течії в регулюючому відсіку ЦВТ парової турбіни потужністю 325 МВт. Виконано оцінку ефективності використання лопаток направляючого апарату, малочутливих до нерозрахункових кутів натікання. Представлено аналіз особливостей розповсюдження та затухання нерівномірності параметрів потоку в регулюючому відсіку, спричинених коловою парціальністю, для режимів роботи з різним ступенем парціальності.

В **четвертому розділі** сформульовано положення щодо напрямків покращення регулюючого відсіку, а саме: повна або часткова відмова від використання вирівнюючої камери; застосування решіток, малочутливих до нерозрахункових кутів натікання; розміщення регулюючого ступеня на середньому діаметрі, близькому до діаметра першого ступеня тиску; встановлення в осьовому напрямку на місце камери вирівнювання тиску додаткового ступеня для забезпечення ефективного використання теплового перепаду.

Запропоновано новий підхід до організації парціального пароросподілу – радіальний пароросподіл. Представлено схему регулюючого ступеня з радіальним підводом пари, що аналогічна за режимами роботи до вихідної конструкції з коловою парціальністю. Показано, що основні процеси вирівнювання потоку відбуваються в робочому колесі регулюючого ступеня, що суттєво відрізняється від вихідної конструкції. Використання регулюючого відсіку з радіальним пароросподілом забезпечує збільшення потужності ЦВТ на $1-2$ МВт та зниження втрат кінетичної енергії на $6-11$ % для основних режимів порівняно з вихідною конструкцією.

Розроблено геометричну форму проточної частини регулюючого відсіку ЦВТ парової турбіни потужністю 325 МВт з існуючою системою соплового пароросподілу, що складається з регулюючого ступеня та двох ступенів тиску діагонального типу без радіальної камери вирівнювання тиску. ККД розробленого регулюючого відсіку становить 91,0 % на номінальному режимі без урахування втрат на клапанах та 85,8 % із урахуванням втрат на клапанах. Коловий ККД збільшився на 6–10 %, а потужність відсіку – на 1–2 МВт залежно від режиму роботи.

Зауваження. За змістом дисертації та автореферату є такі зауваження:

1. В дисертаційній роботі відсутні результати порівняння розрахунків в квазінестаціонарній постановці з повністю нестаціонарною постановкою, а також відсутні данні, яку похибку квазінестаціонарна постановка вносить в результати розрахунків.
2. В авторефераті та тексті дисертаційної роботи не наведено порівняння характеристик регулюючого відсіку з радіальним пароросподілом та регулюючого відсіку зі ступенями діагонального типу.
3. В тексті дисертації відсутній аналіз перерозподілу втрат кінетичної енергії при переході від вихідного регулюючого відсіку з камерою вирівнювання до регулюючого відсіку з радіальним пароросподілом.
4. Якщо було знехтуване врахування впливу зміни взаємного положення границь ковзання між суміжними вінцями у часі то:
   - На скільки відрізняються інтегральні показники якості відсіку (ККД, потужність) отримані з використанням спрощеної моделі та моделі в якій враховується вплив зміни взаємного положення границь ковзання між суміжними вінцями у часі.
   - З яких міркувань було обране положення границь ковзання між суміжними вінцями в проведених розрахунках.

5. При порівнянні коефіцієнтів колової нерівномірності основних параметрів потоку пари не зрозуміло на якій відстані від вихідних кромок робочого колеса регулюючого ступеня оцінювалися коефіцієнти нерівномірності.
6. Одним із напрямків покращення показників якості регулюючого відсіку є зменшення наявного теплового перепаду регулюючого ступеня. Для досягнення цієї мети здобувачка пропонує наступне: «переміщення регулюючого ступеня на середній діаметр, що розміщений максимально близько до діаметра першого ступеня тиску». Таке формулювання не зовсім коректне. Більш правильним було б наступне формулювання: «приведення (зменшення) середнього діаметру регулюючого ступеня максимально близько до середнього діаметру першого ступеня тиску».
7. Відомо, що ступені з більшою реактивність мають менший наявний тепловий перепад. На жаль в дисертації відсутні матеріали аналізу впливу степені реактивності регулюючого ступеня на показники якості регулюючого відсіку.
8. Як впливає вентиляція на часткових режимах роботи регулюючого ступеня з радіальною парціальністю на температуру його робочих лопаток. При коловій парціальності підвищення температури робочих лопаток від вентиляційних втрат не суттєве, так як проходить почергова зміна зони вентиляції на обтікання робочих лопаток основним потоком пари та відповідно їх охолодження.
9. Метод мінімуму максимальної кривизни для аналітичного формування обводів турбінних профілів вперше був розроблений в 80-ті роки минулого століття (проф. Бойко А.В. та к.т.н. Кожевниковим С.М.). В дисертації відсутні посилання на ці роботи.
10. В дисертації не наведено обґрунтування та необхідні пояснення щодо окремого почергового проєктування спочатку робочої лопатки, а потім соплової лопатки (комплексний алгоритм проєктування ПЧ ступеня турбіни (рис. 2.10).

11. На багатьох рисунках де зображені решітки турбінних профілів надаються тільки форми «одиноких» профілів, що не дозволяє побачити форму каналів між ними, а форма каналу є більш інформативна, ніж форма профіля.
12. З матеріалів дисертації не зрозуміло яким чином враховувалися прикореневі, діафрагменні та радіальні перетікання пари в проточній частині регулюючого відсіку та всього циліндру високого тиску.
13. В дисертації не наведені пояснення (Рис. 3.10а) причин виникнення піків потужності регулюючого відсіку, які виникають при витраті пари в 700 т/г та 900 т/г.
14. На рис. 3.12 наведені вихідний та модернізований профілі соплової решітки регулюючого ступеня. Ширини цих профілів різні. Не зрозуміло яким чином в цьому випадку досягаються умови міцності та вібраційної надійності соплового апарату регулюючого ступеня.
15. Відомо, що при розробці нової форми профіля завжди було доцільно порівняти його характеристики з характеристиками відомих атласних профілів. Чим відрізняється розроблений профіль соплової решітки від відомих атласних профілів 1Н3, 3Н3. Чи перевірялась можливість використання атласних профілів в новій конструкції проточної частини регулюючого ступеня?
16. Рис 4.6. Варіант регулюючого ступеня з радіальною парціальністю. Режим №4. Питання: яка температура пари в периферійній частині каналів робочого колеса. Який рівень вентиляційних втрат буде в цьому випадку.
17. Як впливає від'ємне значення периферійної перекриші між сопловою та робочою решітками регулюючого ступеня з радіальною парціальністю на течію пари в периферійній зоні каналів робочого колеса. Чи можна уникнути від'ємного значення периферійної перекриші?

Наведені вище зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота розв'язує важливе наукове завдання по розробці та дослідженню способів підвищення газодинамічної ефективності та зниженню колової нерівномірності потоку в регулюючих відсіках ЦВТ парових турбін з сопловим пароподілом. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, а її результати мають наукове та практичне значення.

Вважаю, що дисертаційна робота «Підвищення ефективності регулюючого відсіку парової турбіни великої потужності», згідно з п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою № 567 Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року, відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а її авторка, Косьянова Анна Ігорівна, заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки.

Офіційний опонент

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник,
завідувач кафедри
турбінобудування НТУ «ХПІ» Олександр УСАТИЙ

Підпис
ЗАСВІДЧУЮ:
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"
Заковоротний О.Ю.
"21" 08 2020 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ * Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут" * код 02071180 *

Власноручний підпис О.П. Усатого засвідчую