

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Бабаєва Артема Івановича**
«Вплив паророзподілу на ефективність роботи турбін великої потужності»,
що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки»

За фактичними даними, обсяг виробництва електричної енергії електростанціями України, які входять до Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України, в 2017 р. склав 163,27 млрд. кВт·рік та за орієнтовними прогнозами в 2035 р. має збільшитися на 19,1 % та скласти 195 млрд. кВт·рік згідно даних «Нової енергетичної стратегії України до 2035 року». Основними завданнями для галузі енергетичного машинобудування є забезпечення ефективного заміщення чинного енергогенеруючого обладнання при поступовому виведенні з експлуатації обладнання, що відпрацювало свій ресурс; – проведення ефективної модернізації та подовження терміну експлуатації енергогенеруючого обладнання ТЕС і АЕС.

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

Ефективність виробництва електричної енергії на ТЕС і АЕС, що складають основу генерації України, залежить від ефективної роботи паророзподільчих органів парових турбін.

Для потужних парових турбін ТЕС і АЕС зниження тиску при течії робочого тіла в проточному тракту паророзподілу досягає 5,0 % від початкового тиску перед стопорним клапаном, що значно впливає на значення теплового перепаду, що спрацьовується в турбіні. Зменшення втрати тиску в проточному тракту паророзподільчих органів парових турбін веде до збільшення наявного теплового перепаду в турбіні та потужності енергоблоку, що в свою чергу призводить до збільшення вироблення електроенергії без додаткової витрати палива.

Також має місце зниження ефективної роботи парових турбін в процесі експлуатації через абразивний знос елементів проточного тракту паророзподілу та проточної частини лопаточного апарату турбіни, що призводить до зниження ККД, яке за оцінками зарубіжних фахівців в середньому за кожні 5 років може досягати 0,4 %. Крім того, внаслідок абразивного зносу елементів проточного тракту паророзподілу та проточної частини лопаточного апарату турбіни скорочується міжремонтний період експлуатації в 2-3 рази.

Завдання пошуку шляхів підвищення газодинамічної ефективності проточного тракту паророзподілу, а також зниження абразивного зносу проточної частини парових турбін є актуальним.

Свідченням актуальності розглянутої дисертаційної роботи є її виконання відповідно до комплексних науково-технічних робіт згідно бюджетних тем «Моделювання, ідентифікація та оптимізація теплових процесів в об'єктах енергетики з метою вирішення завдань енергоресурсозбереження та підвищення надійності їх роботи» (№ ДР 0115U001091), «Розробка протиерозійних заходів з метою підвищення ресурсу робочих лопаток влжнопарових ступенів турбін великої потужності» (№ ДР 0116U005113), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

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

Дисертаційна робота складається зі вступу, основної частини з 5 розділів, висновків, списку використаних джерел з 89 найменувань та 4 додатків. Матеріал викладено на 186 сторінках машинописного тексту, основного тексту – 127 сторінок, має 85 рисунків та 16 таблиць.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, відзначено її зв'язок з науково-дослідними роботами Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, де виконувалась робота. Сформульовано мету й задачі дослідження. Вказано об'єкт, предмет та методи дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено інформацію про публікації та апробацію викладеного в роботі матеріалу, а також відзначено особистий внесок здобувача.

У першому розділі наведено оцінку впливу значення втрат енергії робочого тіла в проточному тракту паророзподілу і абразивного зносу на показники економічності парової турбіни. Проаналізовано особливості відомих конструкцій пристроїв для зниження абразивного зносу парової турбіни, а також конструкцій та режимів експлуатації елементів паророзподілу сучасних парових турбін.

На основі аналізу стану проблем підвищення ефективності роботи елементів паророзподілу парової турбіни сформульовані основні завдання для їх вирішення.

У другому розділі наведено математична модель течії газу та чисельний метод дослідження газодинамічних процесів в проточному тракту елементів паровпуску парової турбіни і верифікація методу дослідження з даними експериментів.

В результаті верифікації методу дослідження встановлений найбільш раціональний підхід для вирішення поставлених задач.

У третьому розділі наведені результати газодинамічних досліджень структури потоку в проточному тракту паровпуску циліндра парової турбіни та результати дослідження впливу елементів конструкції клапана на рівень втрат енергії робочого тіла та нестационарні характеристики парового потоку.

У четвертому розділі представлено варіант маловитратної реконструкції регулюючого клапана частини високого тиску парової турбіни К-200-12,7 «Турбоатом». Розроблена конструкція направляючої склянки з екраном, що має непроникний сектор, звернений до підводящого патрубку, та силові стійки, наявність якого приводить до зменшення втрат енергії робочого тіла при його течії в проточному тракту клапана кутового типу з одностороннім бічним підведенням пари в клапану коробку.

Також у розділі наведено методичні рекомендації щодо проектування стопорних та регулюючих клапанів з низьким рівнем втрат енергії робочого тіла. Апробація методичних рекомендацій на прикладі модернізації проточного тракту регулюючого клапана парової турбіни К-200-130 та регулюючого клапана К-325-23,5 показала, що модернізована конструкція проточного тракту є більш ефективною за рахунок зниження величини втрати повного тиску на 50 %.

У п'ятому розділі показано оригінальну конструкцію пристрою для очищення пари від сторонніх включень. Вибрані геометричні співвідношення пристрою, що забезпечують мінімальні втрати енергії робочого тіла при очищенні потоку пари від сторонніх включень в порівнянні з іншими відомими пристроями.

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 використанні сучасних методів дослідження, програмних продуктів та математичного апарату,
- на широкому співставленні отриманих результатів з результатами інших дослідників та даними експериментів,
- на загальноприйнятих допущеннях і обмеженнях, що є досить правомірними та забезпечують повторювальність результатів з достатньою точністю,
- на правильному формулюванні отриманих висновків.

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

Достовірність отриманих наукових результатів роботи забезпечувалась коректним застосуванням математичного апарату для вирішення поставлених наукових задач, та підтверджувалась узгодженням результатів розрахункових досліджень з результатами фізичних експериментів та досліджень інших авторів, виконаних за апробованими методиками.

Достовірність отриманих результатів підтверджується результатами верифікації використаного методу дослідження з даними експериментів. Результати верифікації математичної моделі та чисельного методу щодо моделювання руху робочого тіла в проточному тракті регулюючого клапана циліндра високого тиску парової турбіни К-300-240 та стопорно-регулюючого клапана циліндра високого тиску парової турбіни К-1000-60/1500 виробництва «Турбоатом» в широкому діапазоні реальних режимів експлуатації показали задовільний збіг з результатами експериментальних досліджень, як за значенням наведеного коефіцієнта витрати, так і за розподілом тиску уздовж профільної поверхні сідла й запірної чаші клапана.

Максимальна відносна похибка у визначенні наведеного коефіцієнта витрати для моделі регулюючого клапана парової турбіни К-300-240 не перевищує 10,2 % та відповідає режиму відносного відкриття клапана, що визначається як відношення значення підйому запірної чаші до посадкового діаметра на рівні 0,1342, при відношенні тиску на виході з клапана до тиску на вході на рівні 0,9. Відносна похибка по розподілу тиску не перевищує 5,2 % уздовж обводів чаші клапана та 12,7 % для поверхні сідла.

Максимальна відносна похибка у визначенні наведеного коефіцієнта витрати для моделі стопорно-регулюючого клапана парової турбіни К-1000-60/1500 не перевищує 10,7 %.

Наукова новизна отриманих результатів та висновків полягає в тому, що вперше визначено вплив структури течії в тракті регулюючого клапана на рівень втрат енергії робочого тіла у вхідному патрубку та сопловому апараті першого ступеня циліндра турбіни.

Вперше визначено вплив одностороннього бічного підведення пари в клапанну коробку для різних форм профільної поверхні основної запірної чаші клапана на рівень

втрат енергії робочого тіла та рівень динамічних навантажень на робочу поверхню основної запірної чаші.

Вперше визначено вплив зміщення осі підвідного патрубку в сторону віддалення від верхньої кромки сидла клапана для різних геометричних параметрів клапанної коробки на структуру парового потоку та рівень втрат енергії робочого тіла в проточному тракту клапана.

На основі чисельних досліджень набула подальшого розвитку методика проектування стопорних та регулюючих клапанів, яка враховує вплив геометричних співвідношень вхідного відсіку проточного тракту клапанів на їх показники ефективності та надійності.

4. Рекомендації з використання та практична значимість отриманих результатів дослідження

Практична значимість отриманих результатів дослідження полягає в тому, що підвищується ефективність роботи потужних парових турбін ТЕС та АЕС за рахунок зниження рівня втрат енергії робочого тіла в елементах паророзподілу турбоустановки шляхом як виконання маловитратних модернізацій обладнання, що знаходиться в експлуатації, так і при розробці нових проектів конструкцій парових турбін.

Отримані результати використовуються «Турбоатом» як при розробці проектів модернізації паророзподілу парові турбіни ТЕЦ і АЕС, так і при виконанні проектів нових турбін. Результати роботи використані при розробці проектів модернізації паророзподілу ПТ К-200-130 та К-800-240 «Турбоатом» (м. Харків, Україна, акт впровадження ТА-01-653).

Запропонований пристрій для захисту проточного тракту від абразивного зносу дозволяє підвищити надійність парової турбіни в процесі експлуатації та знизити капітальні витрати на проведення ремонтно-відновлювальних робіт. Розробка захищена патентом на винахід.

5. Повнота викладу матеріалів дисертації в опублікованих працях

В опублікованих працях здобувача достатньо повно викладені основні результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертаційної роботи. Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації.

Основні результати дисертації представлено у 12 друкованих роботах, з яких 5 статей у спеціалізованих фахових виданнях України, що входять до переліку рекомендованих МОН та міжнародну реферативну базу Ulrich's Periodicals Directory, 1 патент України на винахід, 2 статті в наукових журналах України, 4 роботи - матеріали конференції.

Дисертація і автореферат написані відповідно до вимог до науково-технічним текстам. Автореферат і висновки повністю відповідають основному змісту роботи.

Основні теоретичні положення, результати та висновки наукового дослідження доповідались автором, обговорювались та отримали позитивну оцінку на наукових семінарах, XV та XVI міжнародних науково-технічних конференціях «Удосконалення енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання» (2015 і 2017 рр., с. Задонецьке, Зміївський р-н, Харківська обл.), XI, XII і XIII Міжнародної науково-

технічної конференції «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування» (2015, 2016 і 2017 рр., м. Харків); Конференції молодих вчених та фахівців «Сучасні проблеми машинобудування» в ІПМаш НАНУ (2015 і 2016 рр., м. Харків).

6. Дискусійні положення та зауваження по дисертаційній роботі і автореферату

1. При визначенні *Предмету дослідження* (вплив газодинамічних процесів на енергетичну ефективність та динамічну надійність елементів паророзподілу парової турбіни) доцільніше було б виділити підвищення енергетичної ефективності елементів паророзподілу парової турбіни шляхом впливу на газодинамічні процеси. Крім того, з тексту дисертаційної роботи не зовсім зрозуміло за якою методикою визначалась динамічна надійність елементів паророзподілу.

2. В першому розділі відсутні прізвища вчених, які досліджували роботу паророзподілу турбоустановок та вплив абразивного зносу. На рисунках відсутні посилання на авторів досліджень та позначення позицій (1-8) конструкцій клапанів.

3. При огляді особливостей експлуатації стопорних та регулюючих клапанів (стор. 45) слід зазначити, що дросельний тип паророзподілу для паротурбінних установок АЕС не завжди передбачає однакову конструкцію клапанів та порядок їх відкриття. Для паротурбінних установок К-220-44 та К-500-60/1500 виробництва «Турбоатом» регулюючі клапани частини високого тиску відрізняються між собою конструкцією та порядком відкриття.

4. На рис. 1.17 немає відповідності між режимом роботи регулюючих клапанів та режимом навантаження паротурбінної установки, яке б дозволило визначити діапазон режимів роботи клапанів, що відповідають режиму номінального та часткового навантаження турбоустановки.

5. В другому розділі при верифікації використаного методу дослідження встановлено, що максимальна відносна похибка по розподілу тиску не перевищує 5,2 % уздовж обводів чаші клапана та 12,7 % для поверхні сідла. При цьому відомо, що втрата тиску на клапанах повинна становити від 5% до 12% на номінальному режимі роботи. Як порівняти однаковий рівень значення тиску та похибки його визначення при розрахунках?

6. В третьому розділі при виборі розрахункових режимів доцільно було б розглядати докритичний, критичний та понадкритичний режими течії робочого тіла у клапані або змінний режим роботи (витрата змінюється від 0 до максимуму на номінальному режимі) замість припущення про значний вплив відносного відкриття РК на формування структури парового потоку у відсіку та режимів, які відповідають течії пара у відсіку при малому – $\bar{h} = 0,064$, середньому – $\bar{h} = 0,137$ та великому – $\bar{h} = 0,192$ відносному відкритті клапана.

7. У п'ятому розділі наведена конструкція пристрою для очистки пару від сторонніх включень для установки на горизонтальній ділянці паропроводу між стопорним та регулюючим клапаном частини високого тиску паротурбінної установки К-200-130. Установка пристрою на ділянці паропроводу до стопорного клапана є більш раціональним з огляду на вдвічі меншу кількість трубопроводів підводу пари.

8. Відсутні результати розрахунків, або експериментальних досліджень, які підтверджують високий рівень сепараційної спроможності пристрою для очищення пари від сторонніх включень.

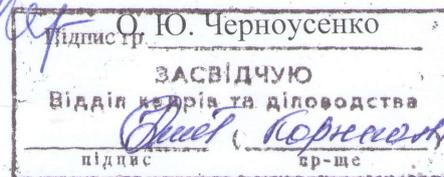
Зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи, яка є завершеним науково-практичним дослідженням. Зміст автореферату повністю відображає основні положення дисертації.

7. Висновок про відповідність дисертаційної роботи вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженому Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (зі змінами)

В цілому можна констатувати, що рецензована робота є закінченим науковим дослідженням, в якому отримані нові науково обґрунтовані результати, та по змісту відповідає паспорту спеціальності 05.05.16 – Турбомашини та турбоустановки. На базі узагальнення результатів теоретичних та розрахунково-експериментальних досліджень створено науково-методичний апарат для вирішення науково-прикладної проблеми підвищення ефективності роботи парових турбін ТЕС і АЕС на підставі вдосконалення елементів паророзподілу парової турбіни.. Дисертаційна робота і автореферат 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 Бабаєва Артема Івановича на тему «Вплив паророзподілу на ефективність роботи турбін великої потужності» відповідає вимогам пп. 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, що висувуються до дисертації, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.16 – Турбомашини та турбоустановки.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри теплоенергетичних
установок теплових та атомних електростанцій
Національного технічного
університету України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,



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



А.А. Мельниченко
А.А. Мельниченко