

ВІДГУК

Офіційного опонента на дисертаційну роботу
Бахмутської Юлії Олегівни

«Збільшення терміну експлуатації роторів парових турбін за рахунок удосконалення теплового та термонапруженого стану на пускових режимах»,
поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.16 – Турбомашини та турбоустановки

Актуальність теми дисертації. Забезпечення надійної експлуатації енергетичного обладнання є запорукою стабільного розвитку економіки країни та запобігання техногенних катастроф. До найбільш відповідальних та високонавантажених вузлів енергетичних машин відносяться ротори турбоагрегатів.

На теперішній час на ТЕС України експлуатується 42 енергоблоки з турбінами типу К-300-240. Харківським заводом АТ «Турбоатом» на заміну турбін К-300-240 випускається турбіна К-325-23,5. АТ «Турбоатом» обмежує ресурс цієї турбіни пусками з різних станів. Так, заводом пропонується 100 пусків з холодного, 1000 – з неостиглого та 2000 – з гарячого станів. Зараз в Україні парові турбіни потужністю 300 МВт використовуються в маневрених напівпікових режимах, які для цього не пристосовані. Це, звісно, призводить до спрацьовування ресурсу. Тому вкрай актуальним є використання сучасних технологій моделювання, дослідження теплового та термонапруженого стану роторів на всьому періоді роботи турбіни, збільшення ресурсу і надійності роторів парових турбін великої потужності.

Вищенаведене дозволяє зробити однозначний висновок, що тема представленої дисертаційної роботи, яка полягає у збільшенні терміну експлуатації роторів парових турбін за рахунок удосконалення теплового та термонапруженого стану на пускових режимах, є актуальною.

Зв'язок роботи з пріоритетними науковими програмами, планами, темами. Представлена дисертаційна робота виконувалась у відділі моделювання та ідентифікації теплових процесів Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України у відповідності з планами науково-дослідних робіт: бюджетна тема «Моделювання, ідентифікація і оптимізація теплових процесів в об'єктах енергетики з метою вирішення задач енергоресурсозбереження і підвищення надійності їх роботи» (№ ДР 0115U001091); цільова програма наукових досліджень НАН України «Науково-технічні основи енергетичного співробітництва між Україною та Європейським Союзом», проект «Вплив перетоків пари у ступенях циліндрів високого та середнього тиску на ефективність їх роботи» (№ ДР 0116U005053); та у відділі вібраційних та термоміцнісних досліджень ІПМаш ім. А. М. Підгорного НАН України – бюджетна тема «Розробка розрахунково-експериментальних методів діагностування віброміцності і

ресурсу енергетичних машин та ракетно-космічної техніки при нестационарних термосилових навантаженнях» (№ ДР 0115U001088); гранту молодих науковців «Визначення граничних умов теплообміну на поверхнях вихідного патрубка ЦВТ парової турбіни для оцінки його термонапруженого стану» (№ ДР 0111U008566), у яких автор була співвиконавцем окремих розділів. Перелік назв тем робіт, у виконанні яких приймала безпосередню участь автор дисертаційної роботи, також свідчить про актуальність її теми і практичну значимість.

Висновки про обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, достовірність основних результатів. Коректна постановка завдань дисертаційного дослідження, використання сучасних методів моделювання теплового та термонапруженого стану роторів парових турбін; апробація результатів роботи на наукових, науково-практичних конференціях; публікація у наукових фахових виданнях, методи оцінки достовірності одержаних результатів дозволяють стверджувати, що наукові положення, висновки та рекомендації, які подані до захисту, є обґрунтованими та достовірними.

Підтвердженням достовірності та значимості отриманих результатів досліджень є також те, що вони набули подальшого використання заводом «Турбоатом» при вдосконаленні конструкції циліндра високого тиску турбіни К-325-23,5, застосовуються у навчальному процесі та стали основою для заявки на патент.

Висновки, приведені автором у дисертаційній роботі, відповідають її змісту й отриманим результатам.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи полягає в отриманні на підставі експериментальних досліджень нової залежності коефіцієнтів тепловіддачі на поверхні ущільнень ступеневого типу з урахуванням фізики течії пари; в запропонованні нового підходу до визначення теплового та термонапруженого стану роторів парових турбін з урахуванням плівкової конденсації та струминного характеру течії пари, а також у виявленні їх впливу на термонапружений стан ротора високого тиску турбіни К-325-23,5; у врахуванні та визначенні параметрів пари на виході з міжкорпусного простору на етапі прогріву турбіни та визначенню області ротора ЦВТ, яка обмежує число пусків.

Практична цінність результатів роботи полягає в тому, що з урахуванням процесу плівкової конденсації, струминного характеру пари, особливостей пуску вперше отримані результати нестационарного теплового та напружено-деформованого стану роторів високого тиску (РВТ) турбіни К-325-23,5 на нестационарних режимах; створено алгоритм врахування плівкової конденсації; запропоновано нову конструкцію переднього

кінцевого ущільнення та умов прогріву РВТ для зниження рівня термонапружень і збільшення допустимого числа пусків.

Оцінка структури, обсягу та змісту роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації – 206 сторінок (141 сторінка основного тексту). Робота включає 57 рисунків, 6 таблиць, список використаних джерел зі 114 найменувань на 13 сторінках, 7 додатків на 34 сторінках.

У вступі сформульовані актуальність теми дисертаційної роботи та основні задачі дослідження і напрямки їх вирішення.

Перший розділ роботи присвячено аналізу сучасного стану енергетичного устаткування ТЕС і ТЕЦ України у відповідності з постановкою задачі. Значну увагу приділено аналізу причин вичерпання ресурсу парових турбін. Проаналізовано та описано причини аварій, які відбуваються на електростанціях. Вказані найбільш небезпечні елементи турбоустановок та небезпечні зони. Здобувач проводить ретельний огляд публікацій науковців та фахівців в області енергомашинобудування. На основі цього аналізу показано необхідність розрахункової оцінки ресурсу та продовження терміну експлуатації турбін великої потужності. Здобувачем обґрунтовано вибір для дослідження парової турбіни К-325-23,5. Вважаючи на те, що турбіни К-325-23,5 випускаються заводом “Турбоатом” для заміни турбін типу К-300-240, які відпрацювали свій ресурс або знаходяться на межі його вичерпання. Автором враховано той факт, що для турбін К325 практично відсутні дані про аналіз термонапруженого стану. Також обґрунтовано вибір ЦВТ як об’єкта дослідження процесів, що відбуваються в турбіні, а РВТ – як найбільш навантажену та дорогу деталь турбоустановки. Проведено аналіз пускових режимів парової турбіни К-325-23,5, вказані особливості роботи, виділені етапи та моменти часу на нестационарних режимах.

Проаналізовано методи дослідження теплового та термонапруженого стану роторів парових турбін. Показано, що розрахункові дослідження елементів турбіни з урахуванням плівкової конденсації відсутні або їх вкрай мало. А врахування процесів, які відбуваються при роботі турбіни, суттєво впливають на точність результатів розрахунків. Вказана необхідність деталізації розрахункових моделей, які впливають на точність результатів теплового та термонапруженого стану високотемпературних елементів.

В якості зауваження по першому розділу дисертації слід зазначити, що на рис. 1.2 представлені кінцеві ущільнення ЦВТ парової турбіни К-325-23,5, які не є знахідкою здобувача. На рис. 1.2 треба робити посилання на відповідну літературу.

У *другому розділі* дисертації, відповідно постановці задачі, запропоновані методики, методологічні підходи, алгоритми для збільшення терміну експлуатації роторів парових турбін за рахунок удосконалення теплового та термонапруженого стану на пускових режимах. Результати теплового та термонапруженого стану залежать від коректного визначення граничних умов теплообміну, які враховують усі процеси, що відбуваються на поверхнях елементів турбомашини. Здобувачем враховано той факт, що на визначення теплових граничних умов впливає розподіл параметрів пари на елементах турбіни. Тому автор враховує особливості прогріву ротора ЦВТ турбіни К-325-23,5 через вихлопний патрубок, та визначає параметри пари з якими він потрапляє на поверхню переднього кінцевого ущільнення через камеру 7, а також враховується гідравлічний опір елементів системи дренажів, перепускних паропроводів згідно з роботою схеми ущільнень на кожному часовому інтервалі. Результати дослідження базуються на ретельному обчисленні коефіцієнтів тепловіддачі та температур на поверхні міжкорпусного простору з урахуванням процесу плівкової конденсації, структури потоку пари в міжкорпусному просторі в залежності від інтенсивності вихрових зон. Здобувач приводить методику для визначення коефіцієнтів тепловіддачі при наявності повітря. Слід зауважити, що врахування повітря є важливим, адже відомо, коефіцієнти тепловіддачі при наявності повітря та коефіцієнти тепловіддачі чистої пари сильно різняться. Не достатньо зрозуміло, яким чином для конкретної задачі враховувався вплив повітря в парі, що знаходиться в міжкорпусному просторі?

Базуючись на даних ЦКТІ, що тріщини виникають в області кінцевих ущільнень, необхідно уважно розглянути фізичні процеси, які виникають на цих поверхнях. Дисертант, на основі експериментальних і розрахункових досліджень пропонує нову методику визначення коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях ущільнень ступінчатого типу, яка враховує струминну структуру течії пари та пульсаційну складову.

При подачі пари на поверхню, температура якої менша за температуру насичення пари, виникає процес плівкової конденсації. Відстежувати моменти часу виникнення та закінчення процесу конденсації на пускових режимах для кожної області ротора є складним завданням. У дисертаційній роботі розроблено алгоритм, який базується на відстеженні температури поверхні елементів парової турбіни в процесі нагрівання в інтерактивному режимі і дозволяє визначати наявність чи відсутність явища конденсації з високою точністю та автоматично призначати відповідні теплові граничні умови для подальших кроків теплового розрахунку.

З другого розділу не зрозуміло, чи враховувався ефект вентиляції в проточній частині на маловитратних режимах? Також не наведені формули для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі та температури масла у підшипниках.

Послідуючі розділи роботи присвячені дослідженню теплового та термонапруженого стану РВТ турбіни К-325-23,5, подовження його ресурсу

та надійності, із застосуванням розроблених методологічних підходів для уточненого визначення граничних умов теплообміну.

У третьому розділі за допомогою методологічних підходів проведено дослідження теплового та термонапруженого стану у пружній постановці задачі при підготовці турбіни до пуску, пуску з холодного та гарячого станів, останові та природньому остиганні, на номінальному режимі. Визначено область ротора, яка не прогривається при пуску з холодного стану та на поверхні якої виникають напруження, що перевищують межу текучості, та, таким чином, обмежують число пусків. Також досліджено вплив плівкової конденсації і врахування струминної течії у впадинах ПКУ на тепловий і термонапружений стан ротора. На рис. 3.13 дисертації показано, що врахування конденсації приводить до підвищення рівня максимальних еквівалентних напружень майже на 30 %, а на рис. 3.14 – врахування фізики струминної течії у впадинах ПКУ підвищує рівень напружень на 13 %. На рис. 3.2 показано розбиття області РВТ під першою обіймою ПКУ на ділянки для призначення теплових ГУ з урахуванням струминної течії. Чи спостерігається струминний характер течії пари в задньому кінцевому ущільненні і чи потрібно його враховувати?

В четвертому розділі вирішене питання по зниженню термонапружень в РВТ, які виникають при пуску з холодного стану. Для цього запропоновані зміни в конструкції переднього кінцевого ущільнення та системі ущільнень, завдяки чому ротор прогривається рівномірно на всьому етапі підготовки до пуску і пуску турбіни з холодного стану. Проведено розрахункове дослідження теплового та термонапруженого стану РВТ турбіни К-325-23,5 та запропонованого РВТ в пружній та пружно-пластичній постановках. Проведено оцінку результатів малоциклової втоми, які показали, що у разі застосування запропонованого варіанта конструкції переднього кінцевого ущільнення та нових умов прогріву допустиме число пусків з холодного стану для РВТ с точки зору ресурсу по механізму малоциклової втоми вдалося значно підвищити у порівнянні з вихідною конструкцією.

Результати дисертаційної роботи будуть використані при вдосконаленні на РВТ турбіни К-325-23,5 заводу "Турбоатом", а також результати досліджень стали основою для заявки на патент «Переднє кінцеве ущільнення циліндру високого тиску потужних парових турбін».

В якості рекомендації, хотілося б відмітити, що таке дослідження доцільно провести і для ротора середнього тиску (РСТ). Адже РСТ є також навантаженим та високотемпературним компонентом турбіни.

Публікації та оприлюднення результатів. За матеріалами проведених досліджень опубліковано 17 наукових праць, з них 6 – у наукових періодичних фахових виданнях України (3 – у наукових українських

виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз); 9 – у матеріалах та тезах конференцій, а також 2 статті – у наукових журналах України.

Основні зауваження по роботі:

1. Не достатньо зрозуміло, яким чином для конкретної задачі, враховувалась наявність повітря в парі в міжкорпусному просторі?

2. Чи враховувався ефект вентиляції в проточній частині на маловитратних режимах?

3. Не приведені формули для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі та температури масла у підшипниках.

4. Чи спостерігається струминний характер течії пари в задньому кінцевому ущільненні і чи потрібно його враховувати?

5. В якості рекомендації хотілося б відмітити, що таке дослідження теплового і термонапруженого стану слід провести і для ротора середнього тиску (РСТ), який є також навантаженим та високотемпературним компонентом турбіни.

6. На рис. 1.2 дисертаційної роботи представлені кінцеві ущільнення ЦВТ парової турбіни К-325-23,5, які не є знахідкою здобувача. На рис. 1.2 треба робити посилання на відповідну літературу.

Однак, сформульовані зауваження не знижують загальної позитивної оцінки роботи, їх слід розглядати як побажання авторів для подальшої плідної науково-дослідної праці.

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

Розглянуті і проаналізовані результати дають всі підстави вважати, що дисертаційна робота Ю.О. Бахмутської є закінченим науковим дослідженням, присвяченому актуальній проблемі, яка полягає у дослідженні факторів та механізмів, що впливають на тепловий та термонапружений стан ротора сучасної парової турбіни К-325-23,5 на нестационарних режимах. Для розрахунку теплового та термонапруженого стану ротора застосовується розроблений здобувачем методичний апарат, який враховує процес плівкової конденсації і фізику течії пари у впадинах кінцевих ущільнень. Шляхом модифікації і зміни технології пуску, враховуючі особливості передпускового прогріву турбіни К-325-23,5 підвищено ресурсні показники (допустима кількість пусків) турбоустановки. Отримані нові науково обґрунтовані результати, які по змісту відповідають паспорту спеціальності 05.05.16 – Турбомашини та турбоустановки.

Автореферат достатньо відображає основні положення дисертаційної роботи. Автореферат і дисертація оформлені з дотриманням вимог, встановлених МОН України 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 Бахмутської Юлії Олегівни на тему «Збільшення терміну експлуатації роторів парових турбін за рахунок удосконалення теплового та термонапруженого стану на пускових режимах» відповідає вимогам пп. 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.16 – Турбомашини та турбоустановки.

Офіційний опонент
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри теплоенергетики та
енергозберігаючих технологій
Української інженерно-педагогічної академії

Т. М. Фурсова

Підпис к.т.н., доц. Фурсової Т. М. засвідчую
Вчений секретар
Української інженерно-педагогічної академії



О. О. Мельниченко