

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

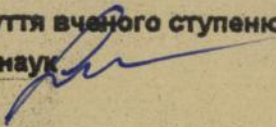
На прагах рукопису

Мазуренко Антон Станіславович

**ДІАГНОСТИКА СТАНУ ТА ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ
ТЕХНІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ТУРБОУСТАНОВОК, ЯКІ
ВІДПРАЦЮВАЛИ ЗНАЧНУ ЧАСТИНУ РЕСУРСУ**

Спеціальність 05.04.12 - "Турбомашини та турбоустановки"

**Автореферат дисертації на здобуття вченого ступеню
доктора технічних наук**



Харків - 1995

НВ 32842

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеському державному політехнічному університеті

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор Слітенко А.Ф.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Гаркуша А.В.

доктор технічних наук, професор Ільченко О.Т.

доктор технічних наук, професор Палагін А.А.

Провідне підприємство - Харківське виробниче об'єднання "Турбоатом"

Захист дисертації відбудеться 21.09 1995 року о 14 год.
на засіданні спеціалізованої Ради Д 02.09.12 при Харківському державному політехнічному університеті:

(310002, Харків, МСП, вул. Фрунзе, 21, ХДПУ).

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Харківського державного політехнічного університету.

Автореферат розісланий 17.08 1995 року.

Вчений секретар спеціалізованої Ради, кандидат технічних наук

Потетенко О.В.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЛНБ України ім. В. Стефаніка



00755420 (N)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми.

В теплоенергетиці України та більшості країн СНД спостерігається досить напружена обстановка, яка визвана тим, що в експлуатації знаходяться енергогенеруючі потужності, уведені, як правило, більше 20 - 30 років тому. При цьому, економічна ситуація, яка склалася, не дозволяє розраховувати на те, що в найближчі роки можливе масове поповнення енергетики новими потужними енергоблоками.

Відомо, що експлуатація, особливо тривала, як парових, так і газових турбін, супроводжується зниженням їх економічності та надійності. В таких умовах важливого значення набуває безперервний діагностичний контроль технічного стану, в тому числі, зміни економічності проточної частини окремих ступенів, відсіків та в цілому циліндрів турбіни з метою прийняття заходів по забезпеченню високоефективного використання встановленого устаткування, оскільки ціна на паливо різних видів безперервно зростає, значно упереджуючи зростання ціни на конструктивні матеріали, затрати на праця та ін.

Крім цього, необхідно прогнозувати зміну основних параметрів турбоустановок, оптимізувати періодичність та зміст ремонтного обслуговування, планувати необхідне резервування потужності енергосистеми з урахуванням реального стану генеруючих потужностей.

Реалізація викладених наукових проблем дозволяє вирішити важливу народногосподарську задачу підвищення ефективності використання і надійності турбоустановок, які відпрацювали значну частину ресурсу. В зв'язку з цим, згідно рішення ДКНТ України в Одеському політехнічному університеті з 1993 року виконується робота "Аналіз стану енергетичних турбін, які відпрацювали значний ресурс та розробка рекомендацій з їх ефективної експлуатації", а відповідно до координаційного плану науково-дослідних робіт Міністерства освіти України виконується робота "Діагностування турбоагрегатів атомних та теплових електростанцій".

Мета роботи полягає в узагальненні багаторічного досвіду експлуатації турбоустановок, які відпрацювали значну частину їх ресурсу, в розвитку методів розрахунку аеродинамічних параметрів проточної частини турбін в умовах зносу та відкладень, в розробці методів та засобів діагностики, заснованих на безперервному контролі економічності турбін, в розробці економічно обґрунтованих рекомендацій по оптимальній експлуатації, організації ремонтно-відновлювальних робіт та формуванні резерву в енергосистемі з урахуванням умов експлуатації та технічного стану встановленого устаткування.

Для виконання поставленої мети необхідно вирішити наступні основні задачі:

- вивчити закономірності зміни надійності та економічності в процесі експлуатації турбін;
- встановити основні причини зміни технічних показників парових та газових турбін по мірі відпрацювання їх ресурсу;
- виконати експериментальні дослідження аеродинамічних характеристик проточної частини в умовах зміни стану турбін;
- розробити методи розрахунку втрат в решітках турбінних лопаток з урахуванням підвищеної шорсткості, визваної ерозійним зносом та утворенням відкладень;
- розробити принципи побудови та основні елементи апаратного та програмного забезпечення систем безперервного діагностичного контролю економічності турбоустановок;
- запропонувати науково-технічні рекомендації для підвищення ефективності експлуатації та ремонтного обслуговування турбоустановок, які відпрацювали значну частину свого ресурсу.

Наукова новизна результатів, наведених в роботі:

- за результатами аналізу експлуатаційних показників турбін великої потужності та спеціальних експериментальних досліджень, вивчення причин відмов устаткування в роботі та обстежень їх стану в період ремонтів, встановлені залежності, які дозволяють об'єктивно оцінити поточний стан та прогнозувати подальшу працездатність, надійність та рівень економічності турбоагрегатів, в залежності від відпрацьованого ресурсу та режимів експлуатації;
- встановлені основні закономірності в зміні стану проточної

частини парових та газових турбін шляхом їх діагностування в процесі експлуатації, а також математичним моделюванням обертального руху часток двокомпонентних потоків в області граничного шару та одержані залежності аеродинамічних втрат в турбінній решітці від відхилення форми та нерівномірної зміни шорсткості поверхні лопаток по обрису профілю;

- науково обгрунтовані та розроблені методи визначення оптимальної періодичності проведення ремонтно-відновлювальних робіт, необхідного резерву енергосистеми та граничних строків експлуатації турбоустановок з урахуванням зниження їх технічних характеристик.

На захист виносяться наступні основні наукові положення та результати:

- розроблені методи розрахунку найважливіших показників експлуатації турбін, які відпрацювали значну частину ресурсу, визначення зміни аеродинамічних показників проточної частини турбін, що працюють в умовах зміни форми профілю лопаток та нерівномірної їх шорсткості;

- система безперервного контролю економічності проточної частини турбіни по її відсікам, як елемент системи повного діагностичного контролю стану турбоустановки, що, при використанні у комплексі, дозволяє прогнозувати зміни цього стану;

- запропонований метод визначення оптимальних строків проведення ремонтно-відновлювальних робіт та крайніх строків експлуатації турбоустановок, які відпрацювали значну частину ресурсу;

Достовірність результатів забезпечується:

- великим обсягом вибірки та надійністю результатів багатовислених натурних досліджень в реальних умовах для широкої номенклатури турбоустановок;

- використанням для обробки експериментальних даних теорії планування експериментів та методів математичної статистики з вживанням сучасних ПЕОМ та програмних засобів;

- адекватністю, у межах прийнятих припущень, запропонованих математичних моделей та реальних процесів, що протікають у турбінах;

- задовільним якісним та кількісним узгодженням результатів теоретичних досліджень з даними експлуатації на електричних станціях.

Практична значимість роботи

Розроблені методи визначення оптимальних міжремонтних строків використовуються на теплових електричних станціях, промислових підприємствах, на яких експлуатується турбінне обладнання.

Запропоновані залежності для розрахунку впливу тривалості та умов експлуатації турбін на стан проточної частини, їх надійність та економічність, дозволяють враховувати реальний технічний стан при плануванні режимів експлуатаційного обслуговування, оцінці економічно виправданих затрат на ремонтно-відновлювальні роботи, а також при формуванні тарифів в сфері електропостачання.

Запропонована система безперервного контролю процесів в проточній частині турбіни дозволяє діагностувати існуючий технічний стан та прогнозувати його зміну, включаючи зміну економічності турбоустановок. Ця система, як складова частина загальної діагностичної системи турбінної установки, дозволяє значно поширити її функціональні можливості.

Результати досліджень використані на потужних електростанціях України та Молдови: - Запорізькій ДРЕС (на блоках 800 МВт), Криворізькій ДРЕС (блоки 300 МВт), Змієвській ДРЕС на блоках 200 та 300 МВт, Молдавській ДРЕС (паротурбінні блоки 200 МВт та парогазові блоки 250 МВт), на турбінах невеликої потужності системи Одесаенерго (Одеській ТЕЦ), а також деяких промислових підприємствах цього регіону.

Апробація роботи

Основні результати роботи доповідались та обговорювались на науково-технічних конференціях, які проходили щорічно в ОдПУ починаючи з 1974 року, на науково-технічних конференціях у Київському, Калінінському та Тульському політехнічних інститутах, в МВТУ ім. Баумана, в Харківському політехнічному університеті, на міжнародних наукових конференціях в Харкові (Змієвська ДРЕС), на енергетичній нараді в м. Козубник (Польща), двічі на науково-практичних конференціях з ремонту енергообладнання в Бельсько-Бяла (Польща) (1992 та 1994 рр.) та ін.

Матеріали роботи використовуються в навчальному процесі у курсі "Парові та газові турбіни" для студентів спеціальності "Теплові електричні станції", в навчових посібниках, курсовому та дипломному проектуванні.

Публікації та особистий вклад автора

Основні наукові положення та результати, які наведені в дисертаційній роботі, одержані автором в період роботи в Одеському державному політехнічному університеті з 1969 по 1995 р.

Методи розрахунку характерних показників експлуатації турбін, які відпрацювали значну частину ресурсу; система безперервного контролю економічності проточної частини турбіни по її відсікам, яка є елементом системи повного діагностичного контролю стану турбоустановки; метод визначення оптимальних строків проведення ремонтно-відновлювальних робіт та граничних строків експлуатації турбоустановок, які відпрацювали значну частину ресурсу; встановлені основні закономірності в зміні стану проточної частини парових та газових турбін в процесі їх тривалої експлуатації, а також математичне моделювання обертального руху часток двоконпонентних потоків в області граничного шару та залежності аеродинамічних втрат в турбінній решітці від відхилення форми та нерівномірної зміни шорткооті поверхні лопаток по обрису профілю запропоновані та реалізовані автором особисто.

В розробці запропонованих принципів оцінки показників експлуатації турбін, які відпрацювали значну частину ресурсу, автору належать основні ідеї, а збір даних багаторічної експлуатації устаткування, деякі експериментальні дослідження, випробовування та впровадження виконаних розробок здійснювалися під науковим керівництвом та при безпосередній участі автора.

Дисертація є самостійним дослідженням і оформлена у вигляді рукопису. Конкретна участь автора підтверджується рядом його особистих публікацій та виступів на Міжнародних, Всесоюзних і Всеукраїнських наукових конференціях та семінарах. Основний зміст роботи відображено в 40 наукових публікаціях.

Обсяг та структура роботи. Дисертація складається з вступу, семи розділів, вклучення, списку літератури, який містить 184 найменування та додатку, в якому наведені документи з випро-

важнина результатів дисертаційної роботи. Робота подана на 390 сторінках машинописного тексту, містить 41 таблицю та 154 малюнки на 99 сторінках.

Зміст роботи

У вступі сформульовані основні положення з проблеми, яка розглядається в дисертаційній роботі. Обґрунтована актуальність роботи, визначена її мета, наука в новина та практична значимість, а також сформульована задача, вирішенню якої присвячена дана дисертаційна робота.

Перший розділ містить критичний аналіз технічного стану турбоустановок потужністю 150 МВт і вище усіх ТЕС України та Молдови (в теперішній час вони працюють в єдиній енергетичній системі) з оцінкою умов експлуатації та тенденцій їх зміни.

Характер та показники експлуатації турбоустановок, які відносяться до основного устаткування теплової електростанції, а також турбін спеціального призначення, визначаються не тільки їх технічним станом, але й, в значній мірі, зовнішніми умовами. До таких зовнішніх факторів належать режими експлуатації (номінальні, часткові навантаження, обертовий резерв та ін.), частотність планових запусків і зупинень, параметри та якісні показники робочого тіла, сезонні погодні умови, вид палива, яке використовується, рівень експлуатації та ін.

Починаючи з 1986 року, а з 1990 року особливо різко, знижується коефіцієнт використання встановленої потужності - $K_{\text{д}}$, який знизився у відношенні до рівня 1986 року майже в 2 рази. Можна відмітити три головні причини такого сильного зниження $K_{\text{д}}$ - спад надійності енергоустаткування, обмеження (з різних причин) в поставках палива, зниження споживання електрики користувачами в зв'язку з зупинкою підприємств, зменшенням обсягів виробництва, впровадженням енергозберігачих технологій та ін. До того ж, якщо в початковий період на зниження $K_{\text{д}}$ головним чином впливає перша причина, то в наступні роки переважний вплив здійснюють дві наступні.

Аналізуючи можливості технічного переозброєння існуючих турбоустановок, які відпрацьовували значний ресурс, можливо виділити наступні рівні реабілітації: малозатратний, оснований на

підтримці стану проточної частини, лабіринтових ущільнень, удосконалення системи регулювання та т.п.; середній, оснований на реконструкції проточної частини, заміні циліндрів чи навіть повністю турбіни (без змін у фундаменті); повна реконструкція зі зміною основного обладнання та допоміжних систем на більш досконали з впровадженням ефективних систем автоматички, діагностики та ін. Оптимальний рівень реабілітації, що застосовується в період ремонтів або реконструкції повинен визначатись результатами глибокого вивчення поточного технічного стану турбінного обладнання та обґрунтованого прогнозування його зміни.

За результатами здійсненого огляду існуючих теоретичних та прикладних розробок, фактичного стану проблеми підтримки технічного стану турбінного обладнання ТЕС та забезпечення оптимальних умов його експлуатації та ремонтного обслуговування, визначені задачі та зміст подальших досліджень.

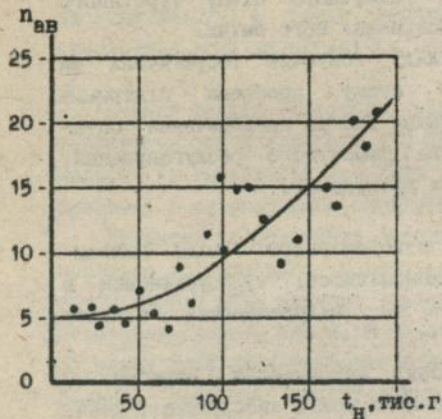
В другому розділі розглянуті закономірності зміни найважливіших показників надійності та економічності турбоустановок в процесі їх тривалої експлуатації та відпрацювання більшої частини ресурсу.

З урахуванням необхідності збору, накопичення, обробки та аналізу великих масивів даних за десятки років експлуатації значного числа енергоблоків, розглянуті можливості сучасних інформаційних технологій для створення баз даних, математичної обробки статистичних даних та оцінки результатів спеціальних експериментів. Для вирішення поставлених задач використані як традиційні методи планування та обробки результатів експериментів, так і оригінальні програми та спеціалізовані програми: продукти - Mathbase, Armtstat, а також інтегровані пакети Framework-3 та Excel 5,0 (в середовищі Windows 3.1).

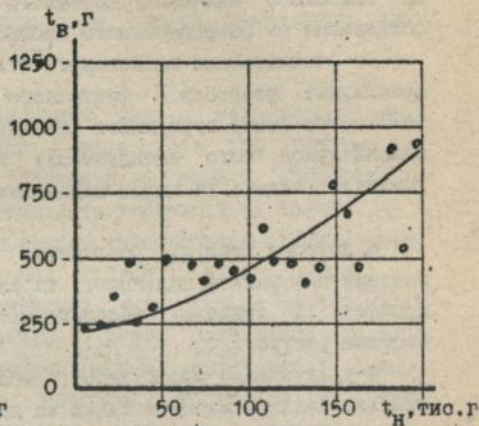
В результаті здійсненого аналізу даних в процесі багаторічної експлуатації на електричних станціях, запропоновані найбільш достовірні показники надійності та економічності в процесі експлуатації, а також встановлені загальні закономірності їх зміни від найважливіших факторів - загального числа годин напруження турбоустановкою та загального числа запусків і зупинок.

На мал. 1 та 2 представлені, в якості характерних, залежності

числа аварійних зупинок на протязі року та сумарний час відновлювання після аварійної зупинки за цей же період від напрацювання блоку №1 МДРЕС (200 МВт). Обробка даних та аналіз на адекватність запропонованої моделі з десяти однотипних енергоблоків, не дивлячись на наявність багатьох випадкових факторів які впливають на ці показники, підтверджує її обґрунтованість. При цьому, співставлення кількісних показників свідчать про індивідуальність кожного з них.



Мал.1. Залежність сумарного числа аварійних зупинок на протязі року від загального напрацювання (год.)



Мал.2. Залежність часу відновлення після аварійних зупинок від напрацювання (год.)

В дисертації наведені також результати розрахунків математичного очікування вірогідності відмов основного та допоміжного обладнання ТЕС з наступною поелементною оцінкою цих показників, виконаних на базі вивчення причин аварійних зупинок на протязі довготривалого часу експлуатації.

На гістограмі (мал. 3) подано співставлення числа аварійних зупинок блоків типу К-200-130 з причини відмов різних їх елементів після відпрацювання розрахункового ресурсу.

встановлено, що в межах розрахункового ресурсу найбільш важливим фактором, який впливає на надійність, є загальний строк напрацювання, а після відпрацювання розрахункового ресурсу різко зростає вплив загального числа запусків та зупинок, тобто параметра циклічності на надійність турбоустановки. При цьому, кожний агрегат має власний технічний "портрет", що необхідно враховувати при подальшій його експлуатації.

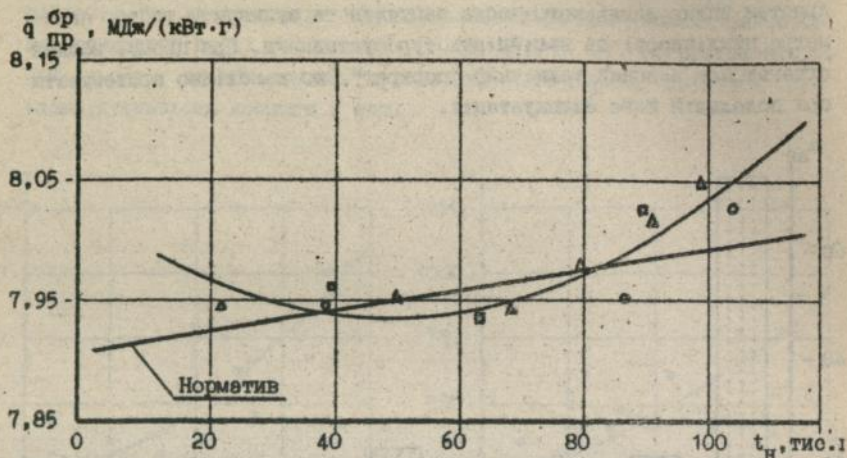


Мал.3. Характерне розподілення числа аварійних зупинок на протязі року через відмови різних елементів блоку.

Обґрунтована також необхідність накопичення та систематизації даних технічного стану турбоустановок в системах діагностування, що потрібно враховувати при їх розробці та адаптації до конкретних агрегатів.

На основі опрацювання даних зміни економічності турбоустановок в процесі тривалої експлуатації встановлено, що основний вплив здійснює зміна стану ЦВТ та ЦСТ турбін. При цьому, існуючі нормативи зміни економічності турбоустановок не відображають реального стану, тому запропоновані рекомендації щодо їх коректування з метою забезпечення об'єктивного підходу до призначення тарифів. На мал. 4 наведено співставлення норматив-

ної та реальної залежностей питомої витрати теплоти від напрацьованого часу.



Мал.4. Залежність нормативної та реальної питомої витрати теплоти на вироблення електрики від напрацьовання для турбоустановок типу К-10-240-3.

З урахуванням цього, для паротурбінних енергетичних установок рекомендовано залежність для визначення розрахункової питомої витрати теплоти виду:

$$q_{пр} = A + B \cdot t + C \cdot t^2,$$

Для вказаного типу турбін коефіцієнти рівняння відповідно дорівнюють: $A = 8,028$, $B = -0,362 \cdot 10^{-5}$, $C = 0,366 \cdot 10^{-10}$ (q в МДж/кВт·год.).

Співставлення технічних показників за період тривалої експлуатації паротурбінних енергоустановок та парогазових зі скиданням газів в котел (ПГУ-250 МВт МДРЕС) показує реальні переваги навіть головних зразків ПГУ, як за показниками економічності, так і надійності, не дивлячись на більш інтенсивне

IX використання.

Третій розділ присвячено експериментальним та натурним дослідженням причин зміни технічних характеристик турбін в процесі тривалої експлуатації.

У цьому розділі викладені результати обстеження стану проточної частини парових та газових турбін після тривалої роботи. При обстеженні аналізувались зміна стану поверхні лопаток проточної частини - її шорсткість, відхилення форми лопаток за рахунок ерозійного зносу та утворення відкладень; зміна геометрії корпусу та стану лабиринтових ущільнень.

Окрім даних, що стосуються стану турбін, які експлуатуються, наведені матеріали, одержані при дослідженні закономірностей утворення відкладень та ерозійного зносу дисперсними потоками лопаточних апаратів на спеціальних "гарячих" експериментальних установках.

Внаслідок виконаної обробки результатів цих досліджень, їх аналізу, виявлені найважливіші фактори, які впливають на інтенсивність утворення відкладень та ерозійного зносу твердими частками в проточній частині парових та газових турбін, особливості їх розподілення в проточній частині. Встановлені закономірності зміни шорсткості поверхні лопаточних апаратів в процесі експлуатації, а також відхилення їх форми від початкової. В результаті виконаного аналізу ефективності існуючих засобів чистки проточної частини на "ходу" та в період ремонтних робіт, запропоновані заходи та технічні рішення, направлені на підвищення якості ремонтного обслуговування.

За даними обстеження стану елементів статору турбіни, у тому числі лабиринтових ущільнень, після тривалого періоду експлуатації (звичайно, з урахуванням ремонтно-відновлювальних робіт), встановлено збільшений знос ущільнень в центральній частині ротору ЦВТ та ЦСТ, що говорить про необхідність нових підходів до організації динамічного балансування гнучких роторів. Встановлено також факт значної повзучості внутрішнього корпусу ЦВТ турбіни К-800-240-3 в радіальному та осьовому напрямках, що потребує відповідного коректування в конструкції та організації відновлення ущільнень.

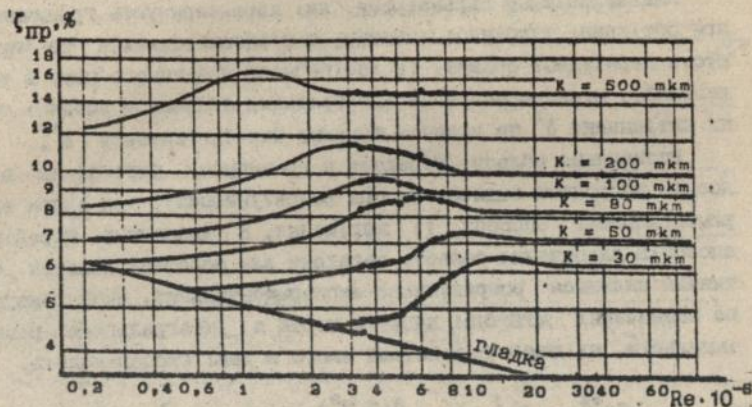
Розділ 4 містить методику розрахунку профільних та кінцевих втрат на турбінних лопатках, засновану на використанні результатів експериментальних досліджень аеродинамічних характеристик турбінних решіток з нерівномірно шорсткими поверхнями лопаток, а також при відхиленні форми лопаток від розрахункової.

Спеціально проведені на аеродинамічному стенді кафедри ТЕС ОдПУ налагоджувальні експерименти дозволили оцінити похибку в визначенні експериментальних даних, а співставлення з результатами продувки решіток гладких лопаток аналогічного типу іншими автоматами підтвердили їх повне узгодження з одержаними аеродинамічними характеристиками.

З урахуванням того, що аеродинамічні дослідження проведені на установці, що дозволяє продувати решітки з достатньо крупними лопатками (з хордою до 100 мм та висотою до 270 мм) при $M \leq 0,33$ і $Re \leq 7,4 \cdot 10^5$, вдалось, крім визначення інтегральних характеристик, проаналізувати характер обтікання як гладких в аеродинамічному відношенні, так і шорстких лопаток в діапазоні зміни відносної шорсткості від $0,03 \cdot 10^{-4}$ до $0,50 \cdot 10^{-4}$. Розподілення тиску та швидкості по обрису профілю, одержане на продренованих лопатках та з допомогою спеціальних мікросондів статичного тиску дозволило оцінити вплив шорсткості та відхилень форми профілю на характер обтікання, виявити зони вірогідного відриву потоку і, таким чином, дати більш глибоке роз'яснення особливостям одержаних інтегральних характеристик.

На мал. 5 приведені результати визначення профільних втрат для активних робочих лопаток з різною шорсткістю в діапазоні зміни числа Рейнольдса від $3,6 \cdot 10^5$ до $7,4 \cdot 10^5$.

З урахуванням того, що шорсткість, яка виникає під час експлуатації на лопатки турбін розподіляється по поверхні нерівномірно, встановлені закономірності впливу шорсткості окремих частків лопаток на профільні втрати. При більшій шорсткості ($\bar{k} = 1,0 \cdot 10^{-3}$) для всього розглянутого діапазону зміни Re (від $3,6 \cdot 10^5$ до $7,4 \cdot 10^5$), а також при $\bar{k} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ і більших швидкостях ($Re = 7,4 \cdot 10^5$) основний вплив на профільні втрати здійснює шорсткість випуклої поверхні лопатки зі сторони вхідної крайки. Відносна шорсткість $\bar{k} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ при меншому значенні числа Рейнольдса ($3,6 \cdot 10^5$), визиває інтенсивне зростання втрат лише при її наявності на поверхні у вихідній крайки.



Мал. 5. Залежність профільних втрат від режиму для лопаток з різною загальною шорсткістю поверхні.

Шорсткість увігнутої поверхні лопаток, що за величиною порівнюється з критичною шорсткістю ($\bar{k} = 0,5 \cdot 10^{-3}$), спричиняє помітний вплив на профільні втрати лише в тому випадку, якщо вона простягається до вихідних країв. Більша шорсткість ($\bar{k} = 1,0 \cdot 10^{-3}$) призводить до зростання втрат при її наявності і на вхідній країці. Однак найбільш інтенсивне збільшення втрат також спостерігається при шорсткості вихідних країв.

Встановлені якісні та кількісні залежності кінцевих втрат від шорсткості. Доведено, що основний вплив на ці втрати спричиняє стан торцевої поверхні при малопримітному впливі на кінцеві втрати шорсткості профіля робочої поверхні лопаток.

На підставі виконаних досліджень, запропонована методика врахування впливу на аеродинамічні характеристики турбінних решіток шорсткості довільно вибраної ділянкою міжлопаточного каналу.

В п'ятому розділі дисертації наведені результати розрахунково-експериментальних досліджень локальних та інтегральних характеристик граничного шару на турбінних лопатках, які зазнають на собі вплив ерозійного зносу та відкладень.

Найважливішими параметрами, які характеризують граничний шар при обтіканні турбінної лопатки, є місцезнаходження та протяжність перехідної області (з ламінарного граничного шару в турбулентний), місцеве значення інтегральних в тичин - умовної товщини витіснення δ^* та умовної товщини втрати імпульсу δ^{**} .

Визначення області переходу в граничному шарі є, як відомо, досить непростою задачею як при розрахунковому, так і при експериментальному способі її вирішення. З численних перевірених способів визначення області переходу для коротких лопаток, ефективним виявився розрахунково-експериментальний, який базується на визначенні дотичної напруги тертя з інтегрального рівняння імпульсів, вхідними параметрами якого є дані експериментів.

$$\frac{d\delta^{**}}{dx} + \delta^{**} \left[\frac{1}{\rho_* U_*^2} \cdot \frac{d(\rho_* U_*^2)}{dx} + \frac{H}{U_*} \cdot \frac{dU_*}{dx} \right] = \frac{\tau_*}{\rho_* U_*^2}$$

Тут x - довжина дуги контуру профілю, яка розраховується від вхідної критичної точки; τ_* - напруження тертя на поверхні; U_* і ρ_* - швидкість та щільність середовища на зовнішній поверхні граничного шару; H - формпараметр, рівний δ^*/δ^{**} .

Для нестискуваної рідини, коли $\rho = \text{const}$, можна одержати:

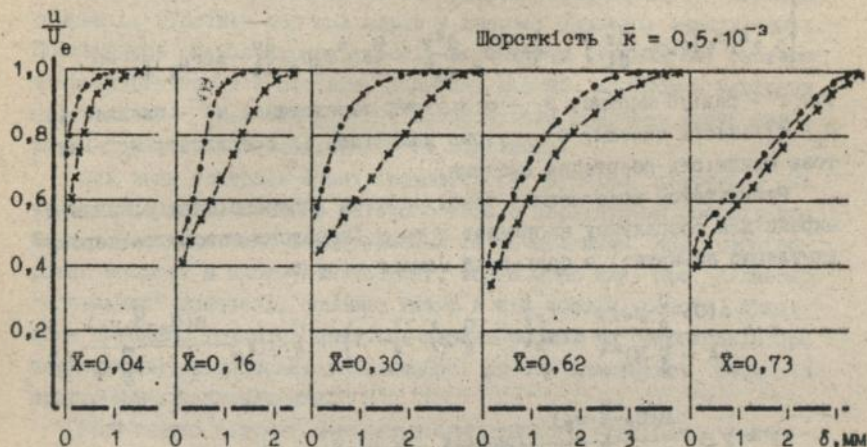
$$\frac{d\delta^{**}}{dx} + \delta^{**} \frac{dU_*}{U_* dx} (2 + H) = \frac{\tau_*}{\rho_* U_*^2} = \frac{c_f}{2}$$

де c_f - коефіцієнт місцевого тертя.

Інтегральні характеристики граничного шару визначались шляхом обробки еп'юр швидкостей граничного шару в відповідних місцях профілю. Розподілення швидкостей в граничному шарі одержано з використанням спеціально виготовлених автором мікрозондів з товщиною приймального патрубку близько 80 мкм. Використання таких зондів дозволило досить "глибоко" проникнути в граничний шар на поверхні лопаток, в тому числі і коротких.

На мал. 6 показані епюри швидкостей для деяких характерних точок випуклої частини профілю з відносними координатами \bar{x} (від

вхідної крайки) при відносній шорсткості поверхні: $\bar{k} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ та різноманітних значеннях числа Рейнольдса.



Мал. 6. Характерні епери швидкостей в граничному шарі випуклої поверхні шорсткої лопатки;
 $x - Re = 7,4 \cdot 10^5$; $o - Re = 3,6 \cdot 10^5$.

Результати дослідження граничного шару дозволили дати об'єктивне пояснення, одержаних автором раніше, фактам, які пов'язані з особливостями впливу стану лопаток на їх аеродинамічні характеристики.

Зміни, які виникають в лопаточних апаратах - знос, утворення відкладень, погіршення якості поверхні викликаються присутніми в потоці робочого середовища твердими частками. Особливу зацікавленість, в зв'язку з його маловивченістю, викликає питання характеру руху часток в межах граничного шару. З урахуванням значного градієнту швидкості в напрямку, перпендикулярному площині елемента поверхні лопатки, частки зазнають інтенсивного закручування, що значно впливає на характер їх подальшого руху. Приймаючи до уваги силу опору, підйомну силу, силу інерції, коріолісову силу та нехтуючи силою ваги, можна одержати наступну сис-

тому рівнянь руху частки в граничному шарі:

$$\begin{cases} \left\{ \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_2 \frac{d^2 x}{dt^2} - 6 \pi r \mu_1 \left(2\omega y - \frac{dx}{dt} \right) - \frac{8}{3} \pi r^3 \omega_0 \rho_2 \left(2\omega y - \frac{dx}{dt} \right) = 0 \right. \\ \left. \left\{ \rho_1 \pi r^3 \omega \left(2\omega y - \frac{dx}{dt} \right) - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_2 \frac{d^2 y}{dt^2} - \frac{8}{3} \pi r^3 \omega_0 \rho_2 \frac{dy}{dt} - 6 \pi r \mu_1 \frac{dy}{dt} = 0 \right. \right. \end{cases}$$

Тут r - радіус частки; ρ_1 - щільність середовища; μ_1 - глейкість; ρ_2 - щільність частки; ω - кутова швидкість її обертання; ω_0 - кутова швидкість обертання системи.

Результатом розв'язання такої системи диференціальних рівнянь є вирази для розрахунку координат x та y (впродовж потоку та перпендикулярно поверхні) в будь-який момент часу t .

$$x = \frac{A(C_0 - \frac{U}{\delta} \cdot y_0)}{(A - \frac{U}{\delta} \cdot B)^2} \left\{ \exp\left[\left(A - \frac{U}{\delta} \cdot B\right) \cdot t\right] - 1 \right\} + \frac{U}{\delta} \cdot t \left(y_0 \frac{B(C_0 - \frac{U}{\delta} \cdot y_0)}{A - \frac{U}{\delta} \cdot B} \right),$$

$$y = y_0 + \frac{B(C_0 - \frac{U}{\delta} \cdot y_0)}{A - \frac{U}{\delta} \cdot B} \cdot \left\{ \exp\left[\left(A - \frac{U}{\delta} \cdot B\right) \cdot t\right] - 1 \right\},$$

де A і B є комплекси:

$$A = -\frac{9}{2} \frac{\mu_1}{r^2 \rho_2} - \frac{\omega_0}{2}; \quad B = 1 / \left(-\frac{12 \mu_1}{\pi r_1^2 \rho_1 \delta} - \frac{16}{3} \frac{\rho_2 \omega_0}{\rho_1 \pi \alpha} \right)$$

Результати розрахунку траєкторії руху часток в межах граничного шару з урахуванням їх закрутки показали, що найбільш дрібні частки, рухаючись впродовж випуклої поверхні лопаток "прижимаються" до стінок, що сприяє утворенню відповідних відкладень, крупні ж частки, різко відкидаються в "ядро" потоку, що пояснює деякі специфічні особливості ерозійного зносу твердими частками. Виявлено вплив dP/dx , кривини поверхні, дисперсності часток на інтенсивність відкладень та їх переважне розташування на поверхні профілю.

Шостий розділ присвячений питанням розробки системи безперервного контролю процесів в проточній частині турбіни. Така система, як складова частина загальної діагностичної системи турбінної установки, дозволяє значно розширити її функціональні

можливості.

Особливу увагу приділено методиці оцінки стану проточної частини за допомогою контролю за зміною економічності окремих ступенів, відсіків або циліндрів в процесі тривалої експлуатації. Поелементна оцінка економічності, доповнюючи традиційні системи віброакустичної діагностики, дозволяє значно поглибити уявлення про поточний стан агрегату та прогнозувати подальші порушення і зміни параметрів економічності та надійності.

Оскільки контроль стану економічності турбіни базується на вимірах параметрів стану робочого тіла з послідовним розрахунком його термодинамічних характеристик та обчисленням ККД перетворення енергії в проточній частині, тобто мова йде про відносно "повільних" процесах, основна увага в цій частині роботи приділена питанням точності вимірів, перетворень та розрахунків при некритичному відношенні до швидкості роботи елементної бази та програмного забезпечення.

Розглянуто варіант системи діагностичного контролю з розосередженим "інтелектом", коли діагностична система контролю економічності є складовою частиною загальної діагностичної системи, в цей же час автономна з апаратного та частково програмного забезпечення. Основними її частинами є: програмно керований комутатор вхідних сигналів чуйників; аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), реалізований на порівнянні методом порозрядного зважування аналогового сигналу чуйника та вихідного сигналу 10-ти розрядного цифро-аналогового перетворювача; мікропроцесорна система збору, обробки та зберігання результатів. Програмне забезпечення здійснює вибір чуйників за зазделегідь встановленим алгоритмом, аналогово-цифрове перетворення, масштабування та запам'ятовування результатів, розрахунок термодинамічних параметрів стану та ККД ступеню, який розглядається або групи ступенів.

Проведені дослідження продемонстрували надійність усіх елементів мікропроцесорної системи діагностичного комплексу. Разом з тим, необхідно мати на увазі те, що найбільш важливим на наступних етапах є накопичення достатнього числа діагностичних ознак, які дозволять сформулювати уявлення про реальний стан агрегату з необхідною мірою достовірності.

У осьомому розділі виконано узагальнення одержаних результатів з метою замкнення низки досліджень від вивчення характеристик граничного шару та параметрів обтікання лопаток з відхиленнями профілів та стану їх поверхні в процесі тривалої експлуатації турбін до оцінки експлуатаційних показників турбінного обладнання ТЕС та розробки науково-технічних рекомендацій щодо підвищення його надійності та економічності в процесі тривалої експлуатації.

З урахуванням викладених вище досліджень, запропонована методика оцінки зміни економічності турбоустановок при зміні стану їх проточної частини. Так наприклад, для парової турбоустановки одержано:

$$\Delta \eta_{\text{ТУ}} \approx \frac{\eta_{\text{TУ}}}{\eta_{\text{ОІ}}} \Delta \eta_{\text{ОІ}}^{\text{T}}$$

Зміна відносного внутрішнього ККД турбіни:

$$\Delta \eta_{\text{ОІ}}^{\text{T}} = \frac{(1 + \alpha) \sum_{j=1}^n \left(\frac{w_j}{\eta_{\text{ОІ}j}^0} \right)^2 \Delta \eta_{\text{ОІ}j}^0 + \Delta \alpha \sum_{j=1}^n \frac{w_j}{\eta_{\text{ОІ}j}^0}}{\left(\sum_{j=1}^n \frac{w_j}{\eta_{\text{ОІ}j}^0} \right)^2}$$

в змінюваному відносному внутрішньому ККД ступеня, в свою чергу:

$$\begin{aligned} -\Delta \eta_{\text{ОІ}j}^0 &= \Delta \zeta_0 (1-\rho) + [\rho + (1-\rho)(1 + X_1^2 - 2 X_1 \cos \alpha_1) \varphi^2] \Delta \zeta_{\text{Л}} - \\ & - \Delta \rho (\zeta_0 - \zeta_{\text{Л}} [1 - (1 + X_1^2 - 2 X_1 \cos \alpha_1) \psi^2]) \end{aligned}$$

Тут α - коефіцієнт "повернення" теплоти, w_j - доля потужності j -ого ступеня по відношенню до внутрішньої потужності турбіни, X_1 - відношення колдової швидкості до швидкості потоку на виході з сопел; ρ - міра реактивності ступеня, ζ_0 і $\zeta_{\text{Л}}$ - втрати в соплах та на робочих лопатках, $\eta_{\text{ОІ}j}^0$ - відносний внутрішній ККД ступеня; φ та ψ - коефіцієнти швидкості відповідно на соплах та робочих лопатках.

Внаслідок аналізу одержаних результатів, визначено доцільним збільшення загальної реактивності ступенів з відносно короткими лопатками, бо в такому випадку вони стають менш чутливими до змін в проточній частині, які мають місце при тривалій експлуатації турбін.

Зниження економічності в процесі експлуатації необхідно враховувати при опт. лізації строків проведення ремонтно-відновлювальних робіт, тобто їх періодичності - τ , так як необхідно

прагнути до мінімуму сумарних витрат від перевитрачення палива - $\Pi(\tau)$ при зменшенні економічності, недовироблення електрики $H(\tau)$ через зниження потужності турбоустановки, а також в період простою в ремонті та витрат на ремонти - K за нормативний строк T_H .

$$\frac{T_H}{\tau} [\Pi(\tau) + H(\tau) + K] = f_{\min}$$

В зв'язку з тим, що $T_H = \text{const}$,

$$\frac{\Pi(\tau) + H(\tau) + K}{\tau} = f_{\min}$$

Тут $\Pi(\tau)$ - додаткові витрати на паливо через пониження ККД установки.

$\Pi(\tau)$ є функцією τ , бо із збільшенням періодів між ремонтами перевитрати палива зростають.

Якщо прийняти $\Delta b(\tau) = a \tau^n$ і $\Delta N(\tau) = b \tau^m$, де Δb - збільшення питомої витрати палива, а ΔN - зниження потужності агрегату, то оптимальне значення τ можна визначити з рівняння:

$$\tau^{n+1} \cdot c_{\Pi} \cdot N \cdot a \frac{n}{n+1} + \tau^{m+1} \cdot c_{\text{зам}} \cdot b \frac{m}{m+1} = K,$$

де c_{Π} - ціна на паливо, $c_{\text{зам}}$ - вартість електрики заміщуючої потужності.

Вирішення цього рівняння відносно τ (при відомих коефіцієнтах a , b , n , m) не викликає труднощів. Однак, для полегшення практичного використання методики при організації технічного обслуговування, побудована номограма, яка дозволяє визначати оптимальний, з техніко-економічних міркувань, строк проведення відповідних відновлювальних заходів або припустиме пониження питомої витрати палива, при якому проведення ремонтно-відновлювальних заходів визначеного рівня є економічно доцільним.

Користуючись одержаними результатами щодо впливу строків та умов експлуатації турбоустановок на їх технічні показники, можна визначити граничний, економічно обгрунтований строк експлуатації устаткування, після якого його робота стає збитковою.

Для такої оцінки запропоноване співвідношення, яке має вигляд:

$$n_{\text{ав}} \cdot b \cdot c_{\Pi} + N_{\text{ел}} \cdot b_{\Pi} \cdot (h_{\text{р\i ч}} - \tau_{\text{ав}}) \cdot c_{\Pi} + \tau_{\text{ав}} \cdot c_{\text{рем}} + N_{\text{ел}} \cdot n_{\text{шт}} \cdot \Phi + \tau_{\text{ав}} \cdot N_{\text{ел}} \cdot c_{\text{зам}} < N_{\text{ел}} \cdot h_{\text{р\i ч}} \cdot c_{\text{св}}$$

За цією нерівністю, підставивши відповідні функціональні за-

лежності - число аварійних зупинок на протязі року $n_{ав} = f(t)$,
 питому витрату палива - $b_{II} = f(t)$ та річний строк простоя при
 післяаварійному відновленні - $\tau_{ав} = f(t)$, а також значення ціни
 палива - c_{II} , розрахункове число годин використання становленої
 потужності за рік - $h_{р\text{іч}}$, вартість електрики замінючої потуж-
 ності $c_{зам}$, вартість електрики на світовому ринку - $c_{св}$, упосе-
 реднена витрата палива на один запуск - B , можна визначити
 граничний, по економічним міркуванням, строк експлуатації.

В зв'язку з природним та немінучим зниженням надійності ро-
 боти устаткування в процесі відпрацювання ресурсу, особливий
 інтерес має оцінка необхідного резерву енергосистеми, який вра-
 ховує реальний стан устаткування.

Вірогідність безвідмовності системи в j -ому інтервалі часу
 може бути визначена за формулою:

$$P_j(\tau) = 1 - \sum_{k=1}^{\infty} P_{kj}(\tau) \cdot q(R_{oj})_k,$$

де $P_{kj}(\tau)$ - вірогідність виникнення k відмов агрегатів в j -ому
 інтервалі тривалістю ΔT_j , яка може бути знайдена для випадку
 пуассонівського розподілення:

$$P_{kj}(\tau) = \frac{[\lambda_j(\tau) \cdot \Delta T_j]^k}{k!} \cdot e^{-\lambda_j(\tau) \cdot \Delta T_j},$$

де $\lambda_j(\tau)$ - сумарна інтенсивність відмов в j -ому інтервалі, яка
 визначається за результатами аналізу надійності встановленого
 в енергосистемі устаткування та прогнозування її зміни з ураху-
 ванням того, що $\lambda_j(\tau) = f(\tau)$;

$q(R_{oj})_k$ - умовна вірогідність того, що при k відмовах агре-
 гатів в j -ому інтервалі часу виникне відмова системи, тобто су-
 марна потужність енергетичних агрегатів, введених з роб ти
 внаслідок відмов, перевершить потужність оперативного резерву
 $- N_{резj}$.

Значення $q(R_{oj})_k$ може бути визначене з розподілу Лапласа:

$$q(R_{oj})_k = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma_{kj}^2}} \int_{N_{резj}}^{\infty} \exp\left[-\frac{(x - N_{kj})^2}{2 \sigma_{kj}^2}\right] dx.$$

Тут N_{kj} - середнє значення сумарної потужності k вимовивших агрегатів в j -ому інтервалі часу. Приблизний вираз для визначення N_{kj} за умовою пуассонівського потоку відмов (при достатньо великому значенні n_{pi}) має вигляд:

$$N_{kj} = k \cdot \sum_{i=1}^{n_{pi}} \lambda_i(\tau) \cdot N_{pi} \left[\sum_{i=1}^{n_{pi}} \lambda_i(\tau) \right]^{-1}.$$

σ_{kj}^2 дисперсія сумарної потужності N_{kj} може бути визначена за формулою:

$$\sigma_{kj}^2 = k \cdot \sum_{i=1}^{n_{pi}} [N_{pi} - N_{kj}(\tau)]^2 \cdot \lambda_i(\tau) \cdot \left[\sum_{i=1}^{n_{pi}} \lambda_i(\tau) \right]^{-1}.$$

В наведених формулах $n_{pj} = n_j - n_{ремj}$ - число агрегатів системи в j -ому інтервалі за винятком агрегатів, які виведені в плановий ремонт.

Величина оперативного резерву в j -му інтервалі часу - R_{0j} дорівнює:

$$R_{резj} = \sum_{i=1}^{n_{pj}} N_{pi} - N_i.$$

Тут N_{pi} - загальна потужність множини агрегатів n_p в j -ому інтервалі, а N_i - величина розрахункового навантаження в цьому ж інтервалі часу.

Приймаючи різноманітні значення розрахункового резерву, можливо отримати характеристику, яка відображає вірогідність безвідмовної роботи енергосистеми у цілому і таким чином, при заданій величині надійності енергозабезпечення - P_j , встановити величину резервної потужності.

Отримані в результаті аналізу технічного стану турбінного обладнання ТЕС показники надійності дозволили наповнити наведену методику конкретним змістом і, таким чином, забезпечити можливість розрахунку резерву для забезпечення гарантованої надійності енергопостачання (при відсутності особливих зовнішніх умов).

Розробки, методики і практичні результати впроваджені та використовуються в енергосистемах, на теплових електричних станціях та в інших областях використання тубоустановок з метою підвищення техніко-економічних показників їх експлуатації в умовах значного

відпрацювання ресурсу.

Впровадження рекомендацій з удосконалення технології чистки проточної частини турбін, які працюють з відкладеннями та завищеної шорсткості поверхні ослових та робочих лопаток, оптимізації ремонтно-відновлювальних робіт з урахуванням їх вартості та можливості підвищення при цьому економічності турбоустановок, використання методики оцінки реального стану енергоблоків та прогнозування зміни найважливіших їх технічних параметрів на найбільш потужних ТЕС України (Криворізькій ДРЕС та Запорізькій ДРЕС), Молдови (Молдавській ДРЕС) в енергосистемі Одесаенерго дозволило одержати річний економічний ефект більше двох мільйонів (в доларовому еквіваленті).

Висновки

Дослідження, виконані в дисертаційній роботі, зумовлені актуальністю проблеми ефективного використання турбоустановок, які відпрацьовували значну частину ресурсу, а також необхідністю врахування реальних умов та показників експлуатації при проектуванні та розробці турбінних установок. В авторефераті приведені основні висновки та рекомендації:

1. Аналіз надійності роботи більше 20 блоків 200 + 800 МВт за десятки років їх експлуатації показує, що для всіх блоків зберігаються однакові тенденції і зміни від напрацювання: в початковий період експлуатації (до 5-ти років) спостерігається тенденція до підвищення надійності в період освоєння, потім показники надійності, що базуються як на частоті відмов, так і важкості їх наслідків, безперервно погіршуються; разом з тим, за кількісними показниками кожен блок, навіть одного і того ж типу, має свої характерні особливості, рівень відхилення яких виходить за загальноприйнятні рамки для однотипних установок.

На основі статистичної обробки накопичених експериментальних даних запропоновані рівняння, які розкривають характерні взаємозв'язки і описують зміни показників надійності в процесі тривалої експлуатації як для окремих турбоустановок, так і узагальнені для установок даного типу. Ці рівняння використані для встановлення об'єктивних нормативних показників зниження надійності, які відоб'єднують зміни стану устаткування.

2. Встановлено, що основний вплив на зміну економічного

турбоустановки в процесі її експлуатації здійснює зміна стану циліндрів високого та середнього тиску.

Робота турбін в умовах відкладень та ерозійного зносу дисперсними потоками супроводжується зміною форми профілю та значним погіршенням стану поверхні лопаток проточної частини. Кількість відкладень на лопаточному апараті проточної частини парових та газових турбін розподіляється нерівномірно по ступенях турбіни та на самих лопатках, і при цьому нестабільна в часі.

В результаті виконаної роботи встановлені основні закономірності зміни стану проточної частини турбін в процесі тривалої експлуатації.

3. За результатами визчення стану статора турбіни, встановлена повзучість внутрішнього корпусу ЦВТ турбін типу К-800-240 як в осьовому, так і в радіальному напрямках. Швидкість повзучості за період біля 150 тис. годин склала $(0,3 - 0,4) \cdot 10^{-7}$ м/(м · год.). Зазначено також збільшення зносу ущільнень в ступенях центральної частини ротору ЦВТ, що вказує на підвищену тут амплітуду вібрації.

4. Вивчено характер впливу зміни форми турбінного профілю в процесі експлуатації, встановлені закономірності та запропонована методика розрахунку впливу нерівномірної по поверхні шорсткості лопаток на профільні втрати в діапазоні шорсткості від аеродинамічно гладкої поверхні до відносно шорсткості $\bar{k} = 1,0 \cdot 10^{-3}$ в діапазоні зміни Re від $3,6 \cdot 10^5$ до $7,4 \cdot 10^6$.

Показано, що основний вплив на профільні втрати здійснює шорсткість випуклої поверхні лопаток з сторони входної крайки, а при менших значеннях числа Рейнольдса ($3,6 \cdot 10^5$), шорсткість викликає інтенсивне зростання втрат лише при її наявності на поверхні біля вихідної крайки.

Встановлені якісні та кількісні взаємозв'язки кінцевих втрат та шорсткості. Показано, що основний вплив на ці втрати здійснює стан торцевої поверхні при малопомітному впливі на кінцеві втрати шорсткості профілю лопаток.

Зазначається доцільність використання в ЦВТ та ЦСТ ступенів з підвищеною реактивністю, які відрізняються більшою стійкістю до змін, характерних при роботі в умовах зносу або відкладень.

5. В результаті експериментального вивчення течії в граничному шарі на шорстких лопатках, встановлено вплив режиму те-

ції та шорткоості на його інтегральні характеристики, на положення та протяжність області переходу з ламінарного граничного шару в турбулентний.

Запропонована математична модель руху твердих часток в граничному шарі турбінних лопаток з урахуванням їх обертання та одержані рівняння для аналітичного розрахунку траєкторії часток. В результаті математичного моделювання руху часток в граничному шарі встановлено ефект розділу потоку часток різних розмірних фракцій.

6. Розроблена концепція та основні елементи системи діагностування економічності проточної частини турбіни, яка складається з апаратної частини та програмного забезпечення і дозволяє виконувати збирання даних та їх попередню обробку, здійснювати запам'ятовування результатів опитування, а потім, після завершення циклу опитування усіх чуйників, обробляти одержані дані та оцінювати значення економічності окремих ступенів або відсіків турбіни.

Обґрунтована необхідність забезпечення при розробці систем діагностування накопичення та систематизації даних з технічного стану турбоустановок, що дозволить більш точно оцінювати його зміни і прогнозувати показники надійності та економічності на перспективу.

7. Розроблена та рекомендована до використання методика оцінки оптимальних з техніко-економічними показниками періодів очистки, заміни лопаточних апаратів або інших відновлювальних заходів в парових та газових турбінах при їх роботі в умовах зниження економічності, в тому числі в умовах зносу та відкладень.

Для зручності практичного використання розробленої методики, запропоновані номограма оцінки оптимальної періодичності виконання відновлювальних робіт з урахуванням потужності турбоустановки, ціни на паливо, інтенсивності зниження економічності та витрат на відновлення, а також номограма оцінки допустимого зниження питомої витрати палива.

8. В умовах відпрацювання значною частиною генеруючого устаткування розрахункового ресурсу, величину необхідного аварійного резерву енергосистеми необхідно, використовуючи запропоновану автором методику, приводити в відповідність з реальним технічним станом устаткування, режимами його експлуатації.

9. У додатку до дисертації наведені акти впровадження, технічні довідки, висновки за результатами використання запропонованих автором методик, рекомендацій та розробок на Запорізькій ДРЕС, Криворізькій ДРЕС, Молдавській ДРЕС, в ВЕО Одесаенерго та його підприємствах, в яких наведено економічний ефект від їх впровадження, а також відмічається вирішення важливої наукової та народногосподарської проблеми, можливість широкого розповсюдження результатів.

Основні публікації по темі дисертації

1. Кардасевич О.А., Мазуренко А.С. Термодинамический анализ и технико-экономическая оптимизация ТОВ.- Изв. вузов СССР, "Энергетика", 1970, N4.
2. Олесевич К.В., Мазуренко А.С., Лавренко В.И., Кукурузняк А.П., Износ лопаток турбин дисперсными потоками. Результаты экспериментов и расчет износа.- Сб. статей "Вопросы внедрения и эксплуатации газотурбинных установок в промышленной энергетике", Калинин, 1974.
3. Мазуренко А.С., Олесевич К.В. Исследование течения в пограничном слое на шероховатой поверхности лопаток турбин.- Сб. "Энергетическое машиностроение", вып. 18, 1974.
4. Кукурузняк А.П., Олесевич К.В., Мазуренко А.С., Лавренко В.И. Влияние дробления твердых компонентов на износ проточной части газовых турбин.- Сб. статей "Вопросы внедрения и эксплуатации газотурбинных установок в промышленной энергетике", Калинин, 1974.
5. Лавренко В.И., Олесевич К.В., Кукурузняк А.П., Мазуренко А.С. Исследование абразивных свойств порошков некоторых материалов.- Сб. статей "Вопросы внедрения и эксплуатации газотурбинных установок в промышленной энергетике", Калинин, 1974.
6. Мазуренко А.С., Олесевич К.В., Лавренко В.И., Кукурузняк А.П. Изменение аэродинамических характеристик решеток профилей при их износе дисперсными потоками.- Сб. статей "Вопросы внедрения и эксплуатации газотурбинных установок в промышленной энергетике", Калинин, 1974.
7. Мазуренко А.С. Олесевич К.В., Кукурузняк А.П., Дегтярь И.И. Изменение экономичности турбин при снижении аэродинамических характеристик лопаток.- Сб. статей Калининского политехнического

института, У, 1975.

8. Кукурузняк А.П., Мазуренко А.С. Повышение ресурса рабочих лопаток газовых турбин при работе на запыленных потоках.- НИИИНФОРМТЯЖМАШ, "Энергомашиностроение", №3, 1975.
9. Мазуренко А.С. Оценка оптимальной компании работы турбин при износе или образовании отложений.- Сб. статей Калининского политехнического института, У, 1975.
10. Дегтярь И.И., Олесевиц К.В., Мазуренко А.С., Кукурузняк А.П. Золовой износ лопаток дымососов рециркуляции газов.- Сб. статей Калининского политехнического тн-та, У, 1975.
11. Мазуренко А.С., Дегтярь И.И., Олесевиц К.В., Кукурузняк А.П. Динамика образования отложений на лопатках газовых турбин при работе на высокосернистых мазутах.- Сб. статей Калининского политехнического тн-та, У, 1975.
12. Мазуренко А.С. Об оптимальной периодичности проведения мероприятий по улучшению состояния проточной части турбин, работающих с износом и отложениями.- Межвузовский сборник научных статей "Вопросы повышения эффективности и надежности теплов энергетических установок", Калинин, 1976.
13. Мазуренко А.С., Дегтярь И.И. К расчету параметров потока сжимаемого газа в криволинейных каналах переменного сечения.- Доклады на всесоюзной научно-технической конференции "Тепло-массообмен и моделирование в энергетических установках", часть II, Тула, 1979.
14. Мазуренко А.С., Никифоров В.А., Пашаев К.Г. Теплоснабжение зданий в европейской части СССР. Гелиотеплоснасосные системы.- Водоснабжение и санитарная техника, М.: 1988, №4.
15. Мазуренко А.С. Оценка влияния неравномерной по поверхности шероховатости лопаток на их аэродинамические характеристики.- "Энергетическое машиностроение", Харьков, 1995, №53-54.
16. Мазуренко А.С. Изменение экономичности турбоустановок типа К-800-240 в процессе длительной эксплуатации,- "Энергетическое машиностроение", Харьков, 1995, №53-54.
17. Мазуренко А.С. Надежность энергетического турбинного оборудования по данным его длительной эксплуатации,- "Энергетическое машиностроение", Харьков, 1995, №53-54.
18. Мазуренко А.С. Наука в Одесском политехническом. Кафедра ТЭС.- Вестник украинского ядерного общества, Одесса, №2-3, 1994.

19. Воинов А.П., Мазуренко А.С., Олесевич Е.К. Проблемы теплоэнергетики Украины и перспективы ее развития, -Труды ученых Одесского политехнического университета, Одесса, 1995.
20. Олесевич К.В., Мазуренко А.С., Лавренко В.И. Сборник программ для расчета на ЭЦВМ тепловых схем и деталей турбин на прочность при курсовом проектировании.- Изд-во ОПИ, Одесса, 1974.
21. Мазуренко А.С. Влияние износа лопаток дисперсными потоками и отложений на аэродинамические характеристики турбинных решеток.- Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, Одесса, 1974.
22. Олесевич К.В., Мазуренко А.С., Лавренко В.И., Кукурузняк А.П. Износ и занос золой лопаток газовых турбин и оценка снижения их экономичности в связи с этим. Тезисы сообщений к научно-техническому совещанию, ЦКТИ, Л.: 1971.
23. Мазуренко А.С., Олесевич К.В., Лавренко В.И., Кукурузняк А.П. Особенности образования отложений на направляющих лопатках газовых турбин при сжигании в них высокосернистых мазутов.- Тезисы докладов на республиканской конференции "Современные проблемы энергетики", К.: 1973.
24. Кукурузняк А.П., Олесевич К.В., Мазуренко А.С., Лавренко В.И., Повышение ресурса лопаток газовых турбин при работе последних на запыленном потоке.- Тезисы докладов всесоюзной конференции "Газотурбинные и комбинированные установки", МВТУ, М.: 1974.
25. Лавренко В.И., Мазуренко А.С. О связи абразивных свойств твердых частиц с их прочностью, микротвердостью и сопротивлением ударному разрушению.- Тезисы докладов всесоюзной конференции "Газотурбинные и комбинированные установки", МВТУ, М.: 1974.
26. Мазуренко А.С., Олесевич К.В. Влияние износа вогнутой поверхности профиля лопаток на аэродинамические характеристики турбинных лопаток.- Тезисы докладов всесоюзной конференции "Газотурбинные и комбинированные установки", МВТУ, М.: 1974.
27. Мазуренко А.С., Олесевич Е.К. Влияние состояния поверхности, режимных характеристик на концевые потери лопаток малой длины.- Тезисы докладов всесоюзной конференции "Газотурбинные и комбинированные установки", МВТУ, М.: 1974.
28. Мазуренко А.С., Дегтярь И.И., Олесевич К.В., Кукурузняк А.П.- Исследование особенностей образования отложений золы и коррозии соплового аппарата газовых турбин при работе на высокосернистом

- мазуте.- Тезисы докл. II республиканской научно-технической конференции "Современные проблемы энергетики", Киев, 1976.
29. Диденко О.И., Олесевич К.В., Мазуренко А.С. Исследование аэродинамики двухрядных решеток турбинных ступеней.- Тезисы доклада III республиканской конференции "Современные проблемы энергетики", Киев, 1977.
30. Мазуренко А.С. Техничко-экономическая оптимизация периодичности чистки турбин, работающих в условиях отложений в проточной части.- Тезисы докладов научно-технической конференции "Математические модели процессов и конструкций энергомашин в системах автоматического проектирования", Готвальд, 1985.
31. Мазуренко А.С., Никифоров В.А. Моделирование регулирующей ступени с сопловым парораспределением на ДВК-2.- Тезисы докладов научно-технической конференции "Математическое моделирование процессов и конструкций энергетических и транспортных турбинных установок в системах их автоматического проектирования", Х.: 1988.
32. Mazurenko A., Nikiforov V. Microcomputer in testing solar energy systems.- Applied optics in solar energy - III, Abstracts, Praha, 1989.
33. Mazurenko A., Mihajlov E. The application of the single chip microcomputers as a purpose to increase the competitive ability of the solar power station.- Applied optics in solar energy - IV, Abstracts, Praha, 1991.
34. Mazurenko A. Prognoza niezawodnosci i ekonomicznosci turbin 200 MW po wieloletniej eksploatacji.- Zeszyty naukowe III konferencja "Gospodarka remontowa energetyki", Bielsko-Biala, 1992.
35. Mazurenko A., Olesevich E, Denisova A. Doswiadczenie eksploatacyjno-remontowe turbin 200 MW.- VIII Konferencji "Remontowej energetyki", Porabka Kozubnik, 1993.
36. Воинов А.П., Мазуренко А.С., Олесевич Е.К. Моделирование показателей надежности и экономичности турбин с учетом изменения режимов их эксплуатации.- Тезисы докладов международной научно-технической конференции "Совершенствование энергетических и транспортных турбоустановок методами математического моделирования, вычислительного и физического экспериментов", Харьков, 1994.
37. Mazurenko A., Ettagi J. Zmiana sprawnosci turbiny w procesie eksploatacji.- Zeszyty naukowe IV konferencja "Gospodarka remon-

towa energetyki", Nr. 199, z.38, Opole, 1994.

38. Mazurenko A., Denisova A. Perspektywy wykorzystania energii słonecznej na Ukrainie.- Zeszyty naukowe IV konferencja "Gospodarka remontowa energetyki", Nr. 199, z.38, Opole, 1994.

39. Мазуренко А.С. Техническое состояние турбин, отработавших расчетный ресурс, и возможности их эффективной эксплуатации.- Тезисы докладов международной научно-технической конференции "Совершенствование энергетических и транспортных турбоустановок методами тематического моделирования, вычислительного и физического экспериментов", Харьков, 1994.

40. Мазуренко А.С., Дмитриев Э.А., Эттаги Юсеф. Контроль изменения экономичности проточной части, как составляющая часть общей диагностики турбоустановки.- Тезисы докладов международной научно-технической конференции "Совершенствование энергетических и транспортных турбоустановок методами математического моделирования, вычислительного и физического экспериментов", Харьков, 1994.

Мазуренко А.С. "Диагностика состояния и пути повышения технических показателей турбоустановок, отработавших значительную часть ресурса".

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.04.12 - "Турбомшины и турбоустановки", Харьковский государственный политехнический университет, Харьков, 1995.

На защиту выносятся теоретическое обобщение в рамках научной проблемы повышения эффективности эксплуатации турбоустановок, отработавших значительную часть своего ресурса, имеющей, с учетом сложившейся ситуации в энергетике, важное народнохозяйственное значение. На основе изучения технического состояния турбоустановок в процессе длительной эксплуатации и закономерностей влияния различных факторов на экономичность и надежность, разработаны экономически обоснованные научно-технические решения по эффективной и надежной эксплуатации турбин, организации ремонтно-восстановительных работ. Осуществлено внедрение полученных результатов на ряде крупнейших тепловых электрических станций Украины и Молдовы, в энергосистемах. Приведены данные по эффективности их использования в энергетической отрасли. Основное содержание работы освещено в 40 научных публикациях.

453919

Ключевые слова: турбоустановка, экономичность, надежность, износ, отложения, шероховатость, пограничный слой, математическое моделирование, диагностика.

Mazurenko A.S. "Diagnostics of state of turbo-plants working off considerable part of resources and ways for increasing their technical indexes "

The dissertation on receiving degree doctor of science (technology) on speciality 05.04.12 - "Turbo-machines and turbo-plants" Kharkov polytechnic university. Kharkov, 1995.

The theoretical generalization, as the scientific problem of rising turbo-plants exploitation effectiveness working of considerable part of its resources, which has a big national economy importance in accordance with the present energetic situation, is proposed on defence of the dissertation. On the research basis the technical state of turbo-plants during long-time exploitation and law influence of different factors on economy and reliability, on based economic scientific-technical effective and reliability of turbine exploitation and organizing repair works are designed in the thesis. Introduction of received results are realized at the biggest warm-electric stations and energy systems in Ukraine and Moldavia. The data of effective using of the results at energy branch of economy are provided. The main content of dissertation is described in 40 scientific publications.

Key words: turbo-plant, economy, reliability, wear, deposit, roughness, boundary layer, mathematic simulation, diagnostics.

Подписано к печати 05.06.95. Формат 60x84/16. Бумага газетная.
Печать офсетная. 1,86 усл.печ.л. 2,0 уч.-л. д.л. Тираж 100 экз.
Заказ № 148

Одесский государственный политехнический университет
270044, Одессе, впр. Шевченко, 1.

