НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОБУДУВАННЯ

ІМ. А. М. ПІДГОРНОГО

Альохіна Світлана Вікторівна

УДК 536.24

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕМЕНТАХ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ тес і аес ШЛЯХОМ РОЗВ’ЯЗАННЯ СПРЯЖЕНИХ ЗАДАЧ ТЕПЛООБМІНУ

Спеціальність 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків-2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України.

Науковий керівник

доктор технічних наук, профессор, академік НАН України Мацевитий Юрій Михайлович, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, директор інституту.

Офіційні опоненти

доктор технічних наук, професор Круковський Павло Григорович, Інститут технічної теплофізики НАН України, зав. відділу моделювання процесів тепломасообміну в об’єктах енергетики та теплотехнологіях.

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Тарасов Олександр Іванович, Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, професор кафедри турбінобудування.

Захист відбудеться 06 березня 2008 року о 14 00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.180.02 в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного за адресою: 61046, м. Харків, вул. Дм. Пожарського 2/10.

З дисертацією можна ознайомитись в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного за адресою: 61046, м. Харків, вул. Дм. Пожарського 2/10.

Автореферат розісланий “04” лютого 2008 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради доктор технічних наук

##### В. С. Марінін

### **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

Актуальність теми

Однією з основних задач, які стоять на цей час перед електроенергетичною галуззю України, є забезпечення надійного та ефективного її функціонування. У зв’язку з цим важливим питанням, яке виникає при експлуатації енергетичного обладнання ТЕС і АЕС, є оцінка та подальший контроль його фізичного стану, що продиктовано, перш за все, вимогами безпеки.

Відомо, що енергетичне обладнання, яке функціонує не енергогенеруючих підприємствах України, перебуває на межі спрацьовування свого ресурсу та потребує або ремонту для продовження строку служби, або повної заміни. Питання продовження ресурсу, нарівні з необхідністю впроваджувати та використовувати нове технічне обладнання, вимагають наявності детальної інформації про параметри його функціонування, а у випадку відсутності такої інформації – розробки методів та засобів її отримання. У зв’язку з цим набуває особливої актуальності задача моделювання теплових процесів, що проходять в енергетичному обладнанні під час експлуатації, яка тісно пов’язана з удосконаленням режимів його роботи.

У межах проблеми, що розглядається в роботі, в одному випадку вибір об’єкта для дослідження теплових процесів обумовлено необхідністю проведення реконструкції та модернізації енергоблоків, у іншому – впровадженням у промислову експлуатацію об’єктів, що мало досліджувались раніше. Для детального вивчення та розширення уяви про теплові процеси, що проходять в розглянутих елементах енергетичного обладнання, в обох випадках було виконано моделювання теплових процесів шляхом розв’язання спряжених задач теплообміну. Застосування такого підходу можливо та доцільно для енергетичних об’єктів, що мають різне функціональне призначення, структуру та принцип дії, зокрема, для малодосліджених елементів, з дуже складною структурою потоку (кінцеві та діафрагмові ущільнення турбомашин з термокомпенсаційними канавками) та недосліджених об’єктів енергетики з внутрішніми джерелами тепла, що розташовані на відкритому просторі (контейнери зберігання відпрацьованого ядерного палива).

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота тісно пов’язана з дослідженнями, які проводились за бюджетною темою № 1.7.2.10 „Моделювання та ідентифікація процесів тепломасообміну в об’єктах промислового значення та енергетики з метою енергозбереження, підвищення надійності та продовження ресурсу” № Д.Р. 0100U004810; госп.договору № 293-26 „Розробка інтерфейсу користувача інформаційної системи моніторингу навантаження енергоблоків ТЕЦ-5” № Д.Р. 0106U012369; бюджетною темою III-11-05 „Розробка наукових основ енергозберігаючих технологій в енергетиці, машинобудуванні та приладобудуванні на основі моделювання, ідентифікації та оптимізації теплових процесів” № Д.Р. 0105U002642, де автор була виконавцем окремих розділів.

Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є забезпечення надійності та безпечності роботи енергетичного обладнання на основі дослідження його теплового стану.

Для досягнення мети, що поставлена, необхідно:

– сформулювати задачу моделювання теплових процесів в елементах енергетичного обладнання в спряженій постановці;

– сформувати математичну модель для розв’язання спряжених задач теплообміну стосовно елементів енергетичного обладнання, що розглядаються;

– чисельно дослідити теплові процеси в елементах енергетичного обладнання та провести аналіз отриманих результатів;

– виробити рекомендації для удосконалення елементів енергетичного обладнання та забезпечення надійності його експлуатації.

Об’єкт дослідження – теплові та гідродинамічні процеси, що проходять в елементах енергетичного обладнання.

Предмет дослідження – тепловий стан кінцевих і діафрагмових ущільнень циліндрів парових турбін та корзин з відпрацьованим ядерним паливом, що розташовані у вентильованому контейнері на площадці зберігання.

Метод дослідження – математичне моделювання з використанням чисельних методів розв’язання спряжених задач теплообміну.

## Наукова новизна одержаних результатів

1. Розвинуто методологію розв’язання спряжених задач теплообміну у частині застосування її для визначення теплового стану енергетичного обладнання ТЕС і АЕС.

2. Вперше отримано температурні поля, векторні поля швидкостей та коефіцієнти тепловіддачі у зоні кінцевих та діафрагмових ущільнень, що дозволили провести верифікацію розробленої методики за наведеними у науковій літературі критеріальними залежностями розрахунку теплообміну.

3. Запропоновано спосіб модернізації роторів з метою продовження їх експлуатації після виявлення дефектів.

4. Розроблено методику контролю навантаження енергоблоків, що дозволяє більш чітко витримувати графік роботи турбіни, що призводить до зниження вірогідності появи пошкоджень на роторах високого та середнього тиску.

5. Розширено діапазон використання критеріальних залежностей розрахунку теплообміну на поверхні роторів у зоні кінцевих та діафрагмових ущільнень турбомашин.

6. Шляхом розв’язання спряжених задач теплообміну вперше отримано температурні поля та векторні поля швидкостей вентильованого контейнера зберігання відпрацьованого ядерного палива марки VSC-24, а також групи контейнерів на відкритій площадці, що дозволило підтвердити безпечність їх зберігання у межах території АЕС протягом тривалого часу.

###### Практичне значення одержаних результатів

1. Під час дослідження теплових процесів в ущільненнях турбомашин розширено діапазон використання критеріальних залежностей для визначення коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях ротора в процесі його прогрівання, що має велике практичне значення при проектуванні та експлуатації турбін.

2. Визначено рівень зміни коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях термокомпенсаційних канавок при нестаціонарних режимах прогрівання ротора у зоні ущільнень. За результатами дослідження запропоновано нові форми термокомпенсаційних канавок, які можна використовувати при модернізації роторів для зниження рівня термонапруги (довідка про використання результатів дисертації ХЦКБ “Енергопрогрес” від 11.12.2007 р.).

3. За результатами дослідження теплових процесів в ущільненнях турбін зроблено висновок про необхідність жорсткого контролю та регулювання режимів їх роботи, особливо під час пусків та зупинів.

4. Розроблена та впроваджена інформаційна система моніторингу навантаження енергоблоків (довідка про використання результатів дисертації на Харківській ТЕЦ-5), що дозволяє за рахунок більш якісної реалізації процесів зміни навантаження турбіни знизити вірогідність появи дефектів.

5. Визначений тепловий стан контейнерів зберігання відпрацьованого ядерного палива, що дозволило зробити висновок про безпечність їх використання при зведенні радіаційно-захисної стіни за периметром площадки зберігання (лист ХІ „Енергопроект” про використання результатів дисертації від 30.11.2007 р.) та їх теплової безпечності протягом тривалого часу зберігання.

Особистий внесок здобувача

Особистий внесок здобувача, відбитий в роботах, виконаних та написаних у співавторстві, полягає у такому:

– у роботах [1 – 6] брала участь у розробці методики розв’язання спряженої задачі теплообміну, проводила розрахунковий експеримент, обробляла результати розрахунку;

– в роботі [5] на основі розв’язання спряженої задачі встановила закономірності теплообміну;

– в роботі [6] брала безпосередню участь у формуванні математичної моделі течії пари в ущільненнях турбомашин;

– в роботі [7] розробила структуру інформаційної системи моніторингу навантаження енергоблоків, реалізувала інтерфейс користувача.

Апробація результатів дисертації

Результати дослідження докладались на конференціях: Сучасні проблеми машинобудування: Конференція молодих вчених і фахівців, Харків, 2004–2006 рр., Удосконалювання турбоустановок методами математичного та фізичного моделювання: Міжнародна науково-технічна конференція, – Змійов, 2006 р.

Публікації

Матеріали даної роботи викладені в 7 статтях у наукових фахових виданнях, затверджених постановами ВАК України.

Структура та обсяг роботи

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і переліку використаних літературних джерел, що містить 79 найменувань, та трьох додатків. Робота викладена на 136 сторінках машинописного тексту, містить 46 рисунків, 11 таблиць, 3 додатки, загальний обсяг 186 сторінки.

**ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У вступі описана проблема й обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, що викликана необхідністю мати достовірні дані про тепловий стан енергетичного обладнання та його елементів. Сформульовано мету й основні задачі дослідження теплового стану обраних об'єктів, а саме – кінцеві й діафрагмові ущільнення турбомашин та вентильовані контейнери зберігання відпрацьованого ядерного палива, розташовані на площадці сухого сховища відпрацьованого ядерного палива (ССВЯП).

У першому розділі розглянуті види задач теплопровідності, серед яких виділені спряжені задачі теплообміну, що дозволяють враховувати взаємний вплив переносу теплоти як у твердому тілі, так й у навколишньому теплоносії. Дано огляд методів розв’язання спряжених задач теплообміну, виділені чисельні методи, у яких сформульована задача апроксимується дискретною моделлю, як правило, у вигляді алгебраїчних співвідношень, що дозволяють визначати чисельні значення шуканих величин. Зазначено, що граничні умови теплообміну в енергетичному обладнанні обумовлюються досить складними процесами, і дотепер вони визначалися як експериментально на модельних установках, так і розрахунковим шляхом із використанням розв’язків обернених задач теплообміну за результатами випробувань натурних об'єктів. Такі методи складні й трудомісткі, часто вимагають значних матеріальних витрат. У ряді випадків, як наприклад, у контейнерах зберігання ВЯП, їхнє застосування просто небезпечно, а отже, технологічно неможливо. Тому для розв’язання поставлених задач необхідно застосовувати чисельні методи розв’язання спряжених задач теплообміну.

Оскільки в елементах працюючих турбін, режими яких змінюються від холостого ходу до номінального при пусках з різних теплових станів, досить складно й дорого проводити експериментальні дослідження, а також одержувати температурні поля для різних тепловиділяючих об'єктів, що проектуються, доцільно застосувати чисельні методи розв’язку, які є менш дорогими й водночас більше інформативним. При такому підході, задаючи умови на границях області, що розглядається, й параметри для газоподібного середовища (пара – в ущільненнях, повітря – в об'єктах, розташованих на території станції), досить просто визначити тепловий стан елементів енергетичного обладнання, що розглядаються.

У другому розділі для поставленої задачі дослідження сформована математична модель, що включає в себе такі рівняння:

1) для газоподібного середовища:

– нерозривності (суцільності);

– руху в’язкого газу – рівняння Рейнольдса;

– енергії;

2) для твердого середовища – рівняння теплопровідності (рівняння Фур'є).

Для замикання система диференціальних рівнянь доповнюється рівнянням стану газоподібного середовища (наприклад, рівнянням Менделеєва-Клапейрона або іншою залежністю щільності середовища від температури й тиску). Для обчислення турбулентних складових, що входять у рівняння руху та енергії, необхідно використати одну з відомих моделей турбулентності. Фізичні характеристики, що входять у рівняння, приймаються згідно з табличними значеннями або аналітичними залежностями у вигляді функції температури й тиску. Розрахункова область задається у вигляді тривимірної сітки; залежно від задачі дослідження вибираються граничні й початкові умови.

Спряжені задачі теплообміну стосовно об'єктів теплоенергетики розглядаються з використанням двох видів систем диференціальних рівнянь:

– система рівнянь у двовимірній осесиметричній постановці – для ущільнень турбомашин;

– система рівнянь у тривимірній постановці – для контейнерів зберігання ВЯП.

Для задачі визначення теплового стану контейнерів зберігання ВЯП математична модель доповнена рівнянням променистого теплообміну.

Умовою спряження області газоподібного середовища, що рухається, і поверхні твердого тіла є рівність теплових потоків на кожній елементарній ділянці їхньої поверхні

.



На основі проведеного аналізу як метод розв’язання спряжених задач теплообміну обрано метод контрольного об’єму. Перевага цього методу в порівнянні з іншими чисельними методами, крім простоти реалізації, полягає в тому, що він забезпечує точне інтегральне виконання фізичних законів для будь-якої групи контрольних об’ємів та для всієї розрахункової області. Як наслідок з'являється можливість одержання досить точних і фізично обґрунтованих результатів розрахунку навіть на відносно грубих сітках з мінімальними витратами машинного часу й оперативної пам'яті ЕОМ.

Для дослідження актуальних об'єктів енергетики вибрано: кінцеві й діафрагмові ущільнення турбомашин (включно з термокомпенсаційними канавками) і контейнери зберігання відпрацьованого ядерного палива. Для термокомпенсаційних канавок в ущільненнях турбомашин визначався коефіцієнт тепловіддачі з використанням закону Ньютона-Ріхмана на підставі розв’язання спряжених задач теплообміну у двовимірній постановці:

,



де Тпот – температура потоку, що обмиває поверхню, Тповi – температура i-ї ділянки поверхні, fi – площа i-ї ділянки поверхні, qi – тепловой потік крізь i-у ділянку поверхні.

Задачу розрахункового дослідження теплових процесів у контейнерах зберігання відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) на ССВЯП необхідно також розглядати в спряженій постановці. Це викликано відсутністю інформації про граничні умови на поверхні контейнера й кошика зберігання. У зв'язку з цим як граничні умови для визначення теплового стану відпрацьованих тепловиділяючих зборок (ВТВЗ) усередині кошика зберігання можуть розглядатися тільки параметри зовнішнього середовища (температура повітря, тиск, швидкість вітру).

Цю задачу доцільно вирішувати в стаціонарній тривимірній постановці, з урахуванням лише впливу зовнішнього вітрового потоку (який може бути спрямований під різним кутом до вентиляційних каналів контейнерів), що обумовлено слабкою зміною інтенсивності тепловиділення ВТВЗ із часом, а також зниженням тепловиділення в часі.

При моделюванні теплових процесів на площадці ССВЯП та у контейнерах зберігання ВЯП вирішуються спряжені задачі теплообміну в стаціонарній постановці як для охолодження кошика зберігання, так і для охолодження контейнера зберігання.

У третьому розділі наведені результати дослідження теплообміну в ущільненнях парових і газових турбін.

Різноманіття форм течії, що утворюється в конструкціях турбомашин, не дозволяє однозначно підійти до вибору єдиної моделі турбулентності для потоків у цих конструктивних елементах. Тому необхідно провести верифікацію розрахунково-теоретичних методів і вибір моделі турбулентності із цілого ряду існуючих у цей час. При верифікації шляхом комп'ютерного моделювання досліджувалась течія в прямоточному ущільненні, результати розрахунків порівнювались з експериментальними даними, що отримані Л. О. Гурою.

Форма течії повітря в ущільненні (рис. 1), що отримана в результаті чисельного моделювання, збігається з візуалізацією при експериментальних дослідженнях. Зіставлення швидкостей потоку й розподілу тисків у розширювальній камері ущільнення дозволило зробити вибір із семи розглянутих на користь „Standard k-е” моделі турбулентності, що далі використовувалась при розв’язанні спряжених задач теплообміну.

Аналогічно була проведена верифікація математичної моделі для визначення інтенсивності тепловіддачі в східчастих і прямоточних ущільненнях. Верифікація проводилася за експериментально отриманими Л. О. Гурою критеріальними залежностями для турбулентного режиму течії, що враховують крок ущільнення S, висоту камери ущільнення H, зазор між гребенем і поверхнею ротора д:

– для прямоточних ущільнень;



– для східчастих ущільнень.



Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними виявило відхилення 4-7% для прямоточного ущільнення (рис. 2) та 3-4% для східчастого (рис. 3), що дозволяє судити про адекватність математичної моделі, що використовується. Результати розрахунків дозволили також розширити діапазон застосування експериментально отриманих критериальных рівнянь до значень чисел Рейнольдса Re = 2,2∙106 для прямоточних та Re = 1,13·106 для східчастих ущільнень.

Дослідження теплових процесів у східчастих ущільненнях з термокомпенсаційною канавкою з метою знаходження коефіцієнтів тепловіддачі на її поверхнях дозволило одержати структуру течії пари (рис. 4), що у зоні виступів і западин ущільнення збігається з візуалізацією, наведеної в роботі Л. О. Гури. Зокрема, добре видно, що в камерах ущільнення та за виступами формуються циркуляційні області. На виході із щілин, утворених гребенями й поверхнею виступів та западин, спостерігається струминна течія. У камері, до якої входить термокомпенсаційна канавка, струмінь, натікаючи на виступ, відхиляється вгору й роздвоюється. Частина струменя рухається в канавку, формуючи в ній за рахунок масообміну із внутрішньою границею струменя течію уздовж поверхні із двома вихрами в центральній зоні. Зменшення швидкості течії уздовж поверхонь 1-3 канавки формує прикордонний шар, що визначає умови теплообміну на цих поверхнях.

Розв’язання спряжених задач теплообміну в стаціонарній та нестаціонарній постановках дозволило також одержати уявлення про характер розподілу коефіцієнта тепловіддачі (КТВ) на поверхні термокомпенсаційної канавки.

У ході розрахункових досліджень розглянуто два варіанти течії робочого середовища. У першому струмінь натікає на перпендикулярно розташовану поверхню 3 виступу. Частина струменя після його розтікання попадає в порожнину канавки, беручи участь у циркуляційному русі в ній. У другому варіанті течію у канавці формував настилаючий струмінь, утворений коротким гребнем ущільнення. Він натікає на поверхню довгого зубця, а в канавці виникає вихрова течія.

На рис. 5 наведено розподіл КТВ по розгорнутій поверхні термокомпенсаційної канавки. Значення КТВ визначалися, виходячи з локальних значень температури й теплового потоку відповідно до закону Ньютона-Ріхмана. Хвилеподібний характер зміни КТВ на поверхні 2 обумовлений, швидше за все, локально вихровим рухом робочого середовища уздовж поверхні.

У роторах, що відробили 170 – 200 тис. годин, виявлені тріщини в радіальному напрямку донної частини термо-компенсаційних канавок. Ремонт таких роторів може бути проведений шляхом видалення частини металу із тріщиною, що приведе до зміни форми термо-компенсаційної канавки. Деякі варіанти геометричної форми канавок, які доцільно використати для ремонту ротору: варіант I – термокомпенсаційна канавка має збільшений радіус донної частини при збереженні вихідної глибини до центра радіуса; варіант ІІ – канавка має збільшену ширину при збереженні радіуса заокруглення й глибини вихідної канавки. Зміни форми канавки здійснювались за рахунок видалення виступаючої частини й одного короткого гребеня. У цьому випадку ширина канавки подвоюється, а зміна форми донної частини канавки дозволяє знизити коефіцієнт концентрації напружень практично вдвічі.

Для запропонованих форм канавок також були визначені характеристики потоку й знайдені значення КТВ на поверхнях (рис. 6).

Графіки зміни у часі середніх значень КТВ на поверхнях термокомпенсаційних канавок наведені на рис. 7. Значення КТВ для варіантів 1 та 2 стає сталим після прогріву поверхонь канавки протягом перших 80 с з моменту надходження пари в ущільнення. При цьому найбільше значення КТВ для обох варіантів встановлюється на поверхні 3 (для варіанта 1 – 484 Вт/(м2К), для варіанта 2 – 397 Вт/(м2К)). Це пов’язано з тим, що струмінь пари, пройшовши камеру, натікає на поверхню 3 під кутом, близьким до 90є, спричиняючи тим самим більш інтенсивний теплообмін на ній у зоні натікання. Більш низький рівень КТВ на поверхнях канавки для варіанта 2 обумовлений меншою інтенсивністю вихрової течії в ній.

Для запропонованих форм канавок (варіанти I та ІІ) зміна КТВ у часі набуває стаціонарного характеру після 800 с від початку надходження пари в ущільнення. Максимальне значення КТВ для поверхні 3 дорівнює 353 Вт/м2К для обох варіантів. Більш низький рівень значень КТВ та уповільнене в часі досягнення стаціонарного значення для І та ІІ варіантів виконання термокомпенса-ційної канавки приводить до зниження градієнта температури поблизу поверхні та, як наслідок, до зниження температурних напружень у місцях радіусних переходів від стінок до дна канавки.

За отриманими у дисертаційній роботі розподілами КТВ на поверхнях термокомпенса-ційних канавок фахівцями відділу вібраційних та термоміцнісних досліджень ІПМаш НАН України було проведене дослідження термонапруженого стану поверхонь роторів у районі термокомпенсаційних канавок, оцінений вплив форми й розміру канавок, спрацьовування ресурсу ротора за фактором малоциклової втоми при роботі турбіни в режимах пікового високоманевреного навантаження, що показало зниження інтенсивності напружень та вплив форми канавки на збільшення ресурсу ротора.

Продовження ресурсу турбіни можливо також за рахунок більше точного ведення графіка навантаження енергоблоків та дотримання темпів навантаження та розвантаження. З цією метою розроблена інформаційна система моніторингу (ІСМ) навантаження енергоблоків, що була впроваджена на Харківській ТЕЦ-5. ІСМ навантаження енергоблоків виконує такі основні функції:

– забезпечує можливість проведення моніторингу активного навантаження й поточного вироблення електроенергії;

– формує рекомендації з найбільш ефективної зміни навантаження відповідно до погодинного графіка, з огляду на максимально припустимі швидкості навантаження (розвантаження) блоку;

– забезпечує збір статистичної інформації про роботу енергоблоків, тобто даних за рівнем і зміною активного навантаження, а також з виконанню добових графіків, що задає Енергоринок.

Як наслідок, ці функції приводять до виключення штрафних санкцій з боку Енергоринку електроенергії, знижуючи відсоток припустимих відхилень у процесі навантаження, розвантаження енергоблока.

У четвертому розділі наведені основні результати дослідження теплового стану контейнерів сухого зберігання ВЯП шляхом розв’язання спряжених задач теплообміну в тривимірній стаціонарній постановці.

Розглянуто вентильований бетонний контейнер (ВБК) для зберігання ВЯП марки VSC-24, що широко використовується на багатьох АЕС світу, а також визначені умови експлуатації контейнера на площадці ССВЯП.

Проведено оцінку необхідності урахування променистого теплообміну при моделюванні теплового стану вентильованого контейнера зберігання ВЯП, що показала необхідність доповнення математичної моделі рівнянням променистого теплообміну.

У розділі досліджено тепловий стан окремо розташованого контейнера в штильових умовах та при вітровому впливі, а також групи контейнерів з урахуванням їхнього взаємного впливу. Температурне поле окремо розташованого контейнера в штильових умовах при температурі зовнішнього повітря Tн = 24°С наведене на рис. 8. При урахуванні вітрового впливу – рівномірного за висотою потоку повітря – на окремо розташований контейнер розглядалося три варіанти напрямку вітру щодо нижніх вхідних вентиляційних каналів. Виявлено структуру руху повітря у вентиляційних каналах контейнера (рис. 9) і показано, що при всіх розглянутих напрямках вітру максимальна температура оболонок ТВЕЛів у центрі кошика зберігання не перевищує максимально припустиму, встановлену при проектуванні контейнерів.

Оскільки дослідження теплового стану контейнерів проводяться із залученням чисельних методів розв’язання системи диференціальних рівнянь, через обмеженість чисельних ресурсів ЕОМ виникають складності з побудовою розрахункової сітки для групи контейнерів. У зв'язку із цим поставлена задача вирішувалася у два етапи.

На першому етапі вирішувалась спряжена задача передачі тепла від кошика зберігання тепловиділяючих зборок до циркулюючого в бетонному контейнері охолоджуючого повітря.

На другому етапі розглядалась спряжена задача передачі тепла від бетонного контейнера (з урахуванням визначеного на першому етапі його теплового стану) у навколишнє середовище.

У першу чергу, при змінних зовнішніх граничних умовах визначаються такі характеристики повітряного потоку, що впливають на тепловий стан ТВЕЛів, розташованих в ВТВЗ усередині багатомісного герметичного кошика (БГК):

– структура повітряного потоку у вихідних вентиляційних каналах ВБК;

– зміна температури повітряного потоку в кільцевому каналі між кошиком зберігання та ВБК з урахуванням теплообміну випромінюванням при відводі тепла від кошика зберігання;

– умови теплообміну в кільцевому каналі між кошиком зберігання та ВБК з урахуванням зміни структури повітряного потоку при впливі вітру на потік нагрітого повітря, що витікає з вихідних вентиляційних каналів ВБК;

– рівень нагрівання повітря в кільцевому каналі між кошиком зберігання та контейнером.

Отримані дані, що впливають на тепловий стан ТВЕЛів усередині МГК, використовуються в подальшому для:

– організації ітераційного процесу визначення структури повітряного потоку, що обтікає контейнери, та його температури при змішуванні з нагрітим повітрям, що витікає з вихідних вентиляційних каналів ВБК;

– розв’язання спряженої задачі передачі тепла від ВБК у навколишнє середовище.

Послідовне ітераційне розв’язання цих задач дає досить гарне уявлення про умови теплообміну в ряді контейнерів та про тепловий стан БГК.

Кількість ітерацій пов’язана з розв’язанням внутрішньої задачі та визначається рівністю температури нагрівання повітря у вентиляційному тракті ВБК у двох наступних ітераціях після розв’язання зовнішньої задачі.

При проведенні розрахункового дослідження теплового стану БГК для групи ВБК, розташованих у поперечному ряді площадки ССВЯП, прийняті такі умови:

– розрахункове дослідження проводиться для поперечного ряду, заповненого десятьма контейнерами й розташованого між такими ж сусідніми поперечними рядами;

– розрахункова область обмежена:

а) у вертикальному перерізі – елементами радіаційно-захисної стіни, розташованими з північної й південної сторін досліджуваного поперечного ряду, і вертикальними площинами, що проходять через вісь симетрії між двома сусідніми поперечними рядами;

б) у горизонтальному перерізі – горизонтальною площиною, що проходить у верхній частині над контейнерами з досліджуваного поперечного ряду, у якій вектор швидкості вітру має стале значення й однаковий напрямок (відсутність зворотного впливу контейнерів на потік вітру).

– напрямок вітру прийнятий уздовж досліджуваного поперечного ряду від радіаційно-захисної стіни, розташованої з північної сторони периметра ССВЯП;

– швидкість вітру по висоті над радіаційно-захисною стіною з північної сторони прийнята сталою;

– тиск повітряного потоку над радіаційно-захисною стіною з південної сторони досліджуваного поперечного ряду (на виході із площадки ССВЯП) прийнято сталим;

– виключено взаємний вплив між контейнерами з досліджуваного поперечного ряду й контейнерами із двох сусідніх поперечних рядів (умова непроникнення в розрахункову область витрати й теплової енергії повітряного потоку у вертикальних перерізах, що проходять через вісь симетрії між двома сусідніми поперечними рядами).

При проведенні розрахункового дослідження теплового стану БГК для групи ВБК, що розташовані у поздовжньому ряді площадки ССВЯП, прийняті аналогічні описаним вище умовам та враховано остигання контейнерів із часом.

Аналіз результатів дослідження теплового стану групи контейнерів, розташованих як у поздовжньому, так й у поперечному рядах площадки ССВЯП, при температурі зовнішнього повітря 24 та 40 °С і вітровому впливі з боку найбільш гарячих контейнерів показує, що значення температури в центрі кошика зберігання ВЯП не перевищує максимально припустиму (350 °С), що свідчить про безпеку експлуатації ВБК із погляду їхнього теплового стану в умовах зведення радіаційно-захисної стіни й вітрового впливу.

**ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ**

1. Аналіз стану об'єктів енергетики (турбін, контейнерів зберігання ВЯП) і режимів їхньої експлуатації показав, що існуючі методи їхнього дослідження як експериментальні, так і розрахункові, не дозволяють повністю вирішувати задачі, пов'язані з реконструкцією працюючого та проектуванням нового енергетичного обладнання. У зв'язку з необхідністю нових підходів до вивчення процесів, що відбуваються в енергетичному устаткуванні, сформульована спряжена задача теплообміну стосовно об'єктів теплоенергетики. Вона була вирішена для кінцевих та діафрагмових ущільнень турбомашин і для контейнерів зберігання відпрацьованого ядерного палива.

2. Сформовано математичні моделі стаціонарних та нестаціонарних теплових процесів, що відбуваються в обраних елементах, які досліджувалися шляхом розв’язання спряжених задач теплообміну. У результаті отримано векторні поля швидкостей робочих тіл, температурні поля найбільш напружених елементів і коефіцієнти тепловіддачі на поверхнях цих елементів.

3. У ході моделювання теплових процесів для оцінки вірогідності отриманих результатів проведена верифікація сформованої математичної моделі й застосованого методу шляхом порівняння результатів розрахунку з результатами визначення шуканих параметрів за критеріальними рівняннями теплообміну. Підтверджено, що при обраній моделі турбулентності, що замикає систему диференціальних рівнянь, отримані обома методами значення коефіцієнтів тепловіддачі практично збігаються, а закономірності їхньої зміни носять однаковий характер. Це дозволило істотно розширити діапазон застосування критеріальних рівнянь убік збільшення чисел Рейнольдса.

4. На основі аналізу результатів моделювання теплових процесів в ущільненнях турбомашин вперше визначені значення коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях роторів при нестаціонарному режимі нагрівання та при різних формах термокомпенсаційних канавок, які можуть бути використані при модернізації роторів для зниження темпу зміни коефіцієнтів тепловіддачі на їхніх поверхнях і, як наслідок, для зниження рівня термонапруженого стану роторів, що дозволить збільшити строк їхньої експлуатації.

5. Для підвищення якості експлуатації енергоблоків була запропонована методика автоматизованого контролю навантаження й розроблена інформаційна система моніторингу для електростанцій.

6. У ході розв’язання методичної задачі щодо визначення теплового стану окремо розташованого контейнера зберігання відпрацьованого ядерного палива встановлено, що умови натікання вітрового потоку на окремо розташований контейнер впливають на розподіл потоку повітря у ВБК, що, однак, не призводить до перевищення понад встановлену при проектуванні температуру оболонок ТВЕЛів у кошику зберігання.

7. Шляхом розв’язання спряжених задач теплообміну було проведено дослідження теплового стану вентильованих контейнерів зберігання відпрацьованого ядерного палива, що розташовані на площадці зберігання. Аналіз результатів розрахункового дослідження дозволив зробити висновок про безпеку експлуатації цих контейнерів на території АЕС при зведенні радіаційно-захисної стіни та при зовнішніх вітрових впливах, що змінюються.

8. Результати досліджень, наведені в дисертаційній роботі, використовуються на підприємствах: ХЦКБ “Енергопрогрес”, ВАТ Харківська ТЕЦ-5 та Запорізька АЕС, що підтверджено довідками про їх використання.

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Алёхина С. В. Решение сопряжённой задачи тепломассообмена при исследовании теплового состояния вентилируемого бетонного контейнера с отработавшим ядерным топливом / С. В. Алёхина, В. Н. Голощапов, А. О. Костиков, Ю. М. Мацевитый // Проблемы машиностроения – Харьков, 2005, т. 8, № 4 – С. 12 – 20.
2. Алёхина С. В. Теплообмен в концевых и диафрагменных уплотнениях паровых турбин / С. В. Алёхина, В. Н. Голощапов, А. О. Костиков, Ю. М. Мацевитый // Пробл. машиностроения. – 2006. – т.9, № 1. – С. 32–40.
3. Алёхина С. В. Теплообмен на поверхностях роторов паровых турбин при пуске из холодного состояния/ С. В. Алёхина, В. Н. Голощапов, А. О. Костиков, Ю. М. Мацевитый // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2006. – № 4. – С. 9 – 16.
4. Алёхина С. В. Нестационарный теплообмен на поверхности роторов турбомашин в лабиринтовых уплотнениях / С. В. Алёхина, В. Н. Голощапов, А. О. Костиков // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2007. – № 1(7) – С. 100 – 102.
5. Алёхина С. В. Расширение диапазона применения критериальных уравнений теплообмена в уплотнениях турбомашин на основе решения сопряженной задачи // С. В. Алёхина, В. Н. Голощапов, А. О. Костиков // Вестник инженерной академии Украины – 2007. – Вып. 2 – С. 142–147.
6. Алёхина С. В. Верификация и выбор модели турбулентности для решения газодинамической задачи течения среды в уплотнениях турбомашин / С. В. Алёхина, В. Н. Голощапов // Проблемы машиностроения – 2007. – т. 10, №2 – С. 37 – 44.
7. Алёхина С. В. Информационная система мониторинга нагрузки энергоблоков ТЭС и ТЭЦ / С. В. Алёхина, А. О. Костиков, В. Н. Голощапов, Г. К. Вороновский, А. Ю. Козлоков // Енергетика та електрифікація – 2007. – №9. – С. 17 – 21.

**АНОТАЦІЯ**

Альохіна С. В. Моделювання теплових процесів в елементах енергетичного обладнання ТЕС та АЄС шляхом розв’язання спряжених задач теплообміну. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, м. Харків, 2008.

Дисертація присвячена питанням дослідження теплових процесів в елементах енергетичного обладнання шляхом вирішення спряжених задач теплообміну, в яких враховується взаємний вплив переносу теплоти як у твердому тілі, так і в навколишньому теплоносії. Проведено дослідження теплообміну в ущільненнях парових та газових турбін шляхом вирішення спряженої задачі теплообміну у двовимірній постановці. Здійснено верифікацію сформованої математичної моделі та розширення діапазону використання критеріальних рівнянь теплообміну. Визначено коефіцієнти тепловіддачі на поверхні ротора у зоні термокомпенсаційної канавки і запропоновано підхід для зниження термічних напружень. Запропоновано методику підвищення якості роботи енергоблоків шляхом впровадження інформаційної системи моніторингу. Шляхом вирішення спряженої задачі теплообміну проведено дослідження теплового стану вентильованого контейнера зберігання відпрацьованого ядерного палива, що розташований на відкритій площадці, та показано безпечність зберігання такого контейнера тривалий час за фактором зміни теплового стану.

Ключові слова: спряжена задача теплообміну, ущільнення турбомашин, коефіцієнт тепловіддачі, контейнери зберігання відпрацьованого ядерного палива.

**АННОТАЦИЯ**

Алёхина С. В. Моделирование тепловых процессов в элементах энергетического оборудования ТЭС и АЭС путем решения сопряженных задач теплообмена. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, 2008.

Диссертация посвящена исследованию тепловых процессов в элементах энергетического оборудования ТЭС и АЭС путем решения сопряженных задач теплообмена. Необходимость иметь достоверные данные о тепловом состоянии энергетического оборудования и его элементов вызвана появлением дефектов в уже использующемся оборудовании и проектированием нового. Для решения поставленной задачи требуется разработка новых подходов, методов и средств получения детальной информации о параметрах функционирования этого оборудования. Одним из таких подходов является методология решения сопряженных задач теплообмена, в которых учитывается взаимное влияние переноса теплоты как в твердом теле, так и в окружающем его теплоносителе. В качестве метода решения этих задач использован численный метод, в котором сформулированная задача аппроксимируется дискретной моделью, как правило, в виде алгебраических соотношений, из которых затем определяются численные значения искомых величин. В качестве объектов исследования выбраны тепловые и гидродинамические процессы, происходящие в концевых и диафрагменных уплотнениях турбомашин с термокомпенсационной канавкой и контейнерах хранения отработавшего ядерного топлива на площадке хранения.

Для поставленной задачи исследования сформирована математическая модель, включающая в себя уравнения: неразрывности, движения вязкого газа, энергии, теплопроводности. Замыкается система дифференциальных уравнений уравнением состояния газообразной среды. Для вычисления турбулентных составляющих скоростей, входящих в уравнения движения и энергии, по результатам верификации использовалась модель турбулентности “Standard k-”. Задача рассматривалась в двухмерной осесимметричной постановке или трехмерной в зависимости от рассматриваемого объекта. Математическая модель задачи в трехмерной постановке дополнена уравнением лучистого теплообмена.

В работе проведено исследование теплообмена в уплотнениях паровых и газовых турбин путем решения сопряженной задачи теплообмена в осесимметричной постановке. В ходе моделирования тепловых процессов для оценки достоверности полученных результатов проведена верификация сформированной математической модели и используемого метода путем сравнения результатов расчета с результатами, полученными по критериальным уравнениям теплообмена. Подтверждено, что при выбранной модели турбулентности, замыкающей систему дифференциальных уравнений, полученные разными методами значения коэффициентов теплоотдачи практически совпадают, а закономерности их изменения носят одинаковый характер. Это позволило существенно расширить диапазон применения критериальных уравнений в сторону увеличения чисел Рейнольдса. Определены значения коэффициентов теплоотдачи на поверхностях роторов при нестационарном режиме нагревания и формах термокомпенсационных канавок, которые могут быть использованы при модернизации роторов для снижения уровня термонапряженного состояния роторов, что позволит увеличить срок их эксплуатации. Для повышения качества эксплуатации энергоблоков предложена методика автоматизированного контроля нагрузки и разработана информационная система мониторинга для электростанций.

Путем решения сопряженных задач теплообмена проведено исследование теплового состояния вентилируемых контейнеров хранения отработавшего ядерного топлива, расположенных на площадке хранения. Анализ результатов расчетного исследования показал, что температура сборок в центре герметичной корзины хранения отработавшего ядерного топлива не превышает допустимую и позволил сделать заключение о безопасности эксплуатации этих контейнеров на территории АЭС.

Ключевые слова: сопряженная задача теплообмена, уплотнения турбомашин, коэффициент теплоотдачи, контейнеры хранения отработавшего ядерного топлива.

**ANNOTATION**

Alyokhina S.V. “Modeling of thermal processes in energy equipment of HES and AES by the solution of the conjugate problems of heat exchange”. – Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.14.06 – technical thermal physics and industrial heat power engineering. – A. M. Podgorny Institute for the Problems of Machinery of NAS of Ukraine. − Kharkov, 2008.

The thesis is devoted the questions of research of thermal processes in the elements of power equipment by the decision of conjugate heat transfer problems, in which the mutual influencing of heat transfer is taken into account both in a solid and in heating, that surrounds him. Research of heat exchange is conducted in the seal of steam and gases turbines by the decision of conjugations task of heat exchange in the two-measured raising. The verification of the formed mathematical model and expansion of range of the use of criteria equalizations of heat exchange was conducted. The coefficients of heat emission are certain on a surface to the rotor in the area of thermal expansion grooves and approach is offered for the decline of thermal tensions. The method of upgrading quality of work of energetic block was offered by introduction of the informative system of monitoring. By the decision of conjugations problem of heat exchange research of the thermal state of the ventilated cask of storage of the spent nuclear fuel is conducted, that located on outside court, and the safety of storage is shown.

Keywords: conjugate heat transfer problems, seal of steam, seal of turbines, coefficients of heat emission, ventilated cask of storage of the spent nuclear fuel.