

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.165.62-192

Беднарська І.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Риндюк Д.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ ТЕПЛООВОГО ТА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ПАРОПРОВІДІВ АЕС

Подовження строку експлуатації енергетичного обладнання атомних станцій є важливим завданням для енергетики України. У статті проведено порівняння методів визначення теплового та напружено-деформованого стану елементів паророзподільної системи АЕС. Відзначено доцільність використання сучасних програмних комплексів, заснованих на методі скінченних елементів, та їх переваги над класичними методами.

Ключові слова: атомна енергетика, клапан, граничні умови, напружено-деформований стан.

Постановка проблеми. Атомна енергетика є альтернативним рішенням порівняно з використанням нафти, вугілля і газу у сфері отримання електроенергії [1]. Атомні електростанції порівняно з тепловими мають низку переваг, особливо з погляду екології. Нині багато промислово розвинутих країн інвестують значні кошти в розвиток атомної енергетики. Україна посідає сьоме місце у світі за показником встановленої потужності АЕС. Сьогодні частка виробітку електроенергії на атомних електростанціях України становить понад 50% від спільного виробітку з тепловими електростанціями. Проте значну частину енергоблоків ТЕС уведено в експлуатацію в 70-х роках ХХ ст., і більшість із них уже вичерпала свій ресурс, фізично й морально застаріла та неминуче буде виводитися з експлуатації попри всі заходи щодо подовження строку їх роботи. Водночас деякі блоки АЕС також близькі, а деякі вже й перевищили свій проектний строк. Окрім того, у зв'язку зі збільшенням частки вироблення електроенергії на АЕС великі енергоблоки потужністю 1000 МВт змушені працювати не в розрахунковому базовому, а на змінних режимах. Це веде за собою збільшення кількості пусків і зупинок, що є додатковим навантаженням на обладнання і кількість яких за весь термін служби обмежена нормативними документами. Робота на змінних режимах може призвести до необхідності розгляду питання

про передчасне виведення деяких атомних енергетичних блоків з експлуатації. Така ситуація вимагає термінового проведення комплексу робіт з аналізу стану обладнання станції, а також розроблення рішень щодо продовження його строку експлуатації.

Одним з елементів обладнання електростанції, що потребує докладної уваги, є система паророзподілення парової турбіни, яка регулює і запобігає подачі пари в проточну область. Конструктивно вона складається з низки клапанів, з'єднаних паропроводами. Особливу увагу варто звернути на стопорний клапан (СК), що виконує повне перекриття подачі пари в турбіну, та регулюючі клапани (РК).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглянемо низку робіт, присвячених вищевказаній проблематиці, серед яких варто звернути увагу на [2–9]. У роботі [3] запропонована розрахункова оцінка індивідуального ресурсу турбіни К-200-130 з визначенням теплового стану (ТС), напружено-деформованого стану (НДС) та малоциклової втомлюваності корпусів, роторів, стопорних клапанів циліндра високого тиску (ЦВТ) та циліндра середнього тиску (ЦСТ) за характерних режимів роботи енергоблоку. Для визначення індивідуального ресурсу турбіни К-200-130 виконана попередня оцінка теплового стану (ТС) АСК ЦВТ і АСК ЦСТ за характерних режимів роботи.

У роботі [2] предметом дослідження є пошкоджуваність і залишковий ресурс автоматичних захисних клапанів ЦСТ парової турбіни К-200-130. Отримано дані щодо теплового і напружено-деформованого стану корпусів клапанів для різних режимів пуску. Визначено сумарна пошкоджуваність і індивідуальний залишковий ресурс. Для АСК ЦСТ розраховувалися граничні умови теплообміну в контрольних точках, що показані на розрахунковій геометричній моделі рис. 1, в яких визначалися розмахи інтенсивності напружень за всі періоди пусків із різних теплових станів.

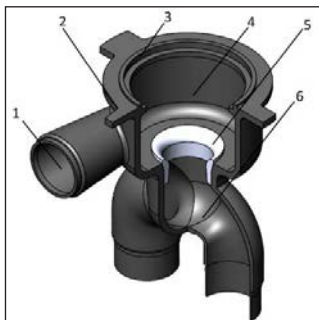


Рис. 1. Розрахункова геометрична модель для АСК ЦСТ [3] (1–6 – контрольні точки)

Технологічні особливості режимів роботи враховували завданням теплових граничних умов III роду й об'ємних відцентрових зусиль у розрахункових елементах. Коефіцієнти тепловіддачі α вираховували за рекомендаціями [4].

Крайова задача нестационарної теплопровідності елементів парових турбін вирішувалася за допомогою рівняння виду [4]:

$$\text{div} \left[\lambda(T) \text{grad } T \right] = c(T) \gamma(T) \frac{\partial T}{\partial \tau},$$

де λ, c, γ , – функції температури і координат за початкової умови $T_0 = T(x, y, z, 0) = f_0(x, y, z)$ та граничних умовах I, II, III або IV роду.

За граничних умов III роду задавали температуру зовнішнього середовища, що оточує тіло, і закон теплообміну між середовищем і поверхнею тіла. Граничні умови третього роду є найбільш загальними і часто використовуваними в практиці розрахунків граничних умов. Як закон теплообміну між навколишнім середовищем і поверхнею тіла найбільш часто в інженерних розрахунках використовують закон тепловіддачі – закон Ньютона:

$$q|_w = \alpha \cdot (T_f - T_w),$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі (згадаємо, що в загальному випадку тепловіддача відбувається конвекцією і випромінюванням); T_f – температура флюїду; T_w – температура поверхні тіла.

З урахуванням закону Фур'є ГУ III роду визначалися в такий спосіб:

$$\pm \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_w = \alpha \cdot (T_f - T_w),$$

де знак + або – у законі Фур'є залежить від вибору початку системи координат.

У розрахунках теплопровідності використовували безрозмірну форму записи граничних умов третього роду:

$$\pm \frac{\partial \Theta}{\partial X} \Big|_w = Bi \cdot \Theta_w,$$

де $\Theta = \frac{T_f - T}{T_f - T_0}$ – безрозмірна температура;

$X = \frac{x}{R}$ – безрозмірна координата, що перпендикулярна поверхні теплообміну;

R – характерний або визначальний розмір тіла;

$Bi = \alpha R / \lambda_w$ – критерій Біо (Biot);

λ_w – коефіцієнт теплопровідності твердого тіла.

Критерій Біо – визначальний критерій у завданнях теплопровідності, тобто від його величини залежить інтенсивність процесу теплопровідності.

Такий класичний підхід до розрахунків включає у себе людський чинник [2–8] та потребує значних затрат часу на розрахунки граничних умов. Також неможливо з достатньою точністю визначити граничні умови для об'єктів складної геометричної форми. За класичного підходу здебільшого складно, а іноді й неможливо повною мірою врахувати конструктивні зміни в елементах енергетичного обладнання, які виникли на протязі всього терміну експлуатації.

Постановка завдання. Детально проаналізувавши даний метод, зроблено висновок щодо його значної трудомісткості під час розрахунків граничних умов та за недостатньої точності розрахунку для об'єктів складної геометричної форми.

Метою роботи є наукове обґрунтування і розроблення комплексного підходу до теплового та напружено-деформованого стану високотемпературних елементів енергетичного обладнання. А саме зроблено спробу розроблення методу, який базується на створенні математичної моделі, що дає змогу, задавши тільки початкові та граничні умови пари на вході й теплопередачу (віддачу) через стінки в клапані, отримати необхідні для розрахунку залишкового ресурсу розподілу температур, їх градієнтів та напружено-деформованого стану об'єкта. Запропонований метод дає змогу значно зекономити час та врахувати газодинаміку поведінки пари в клапані у більш повному обсязі, ніж за класичного підходу, що, своєю чергою, призведе до підвищення точності розрахунку.

Виклад основного матеріалу дослідження. Як приклад для наочності обґрунтування запропонованого підходу вибрано програмний пакет CAE ANSYS. Згідно зі створеним комплексним підходом до проведення перевірного розрахунку теплового, напружено-деформованого стану та пошкоджуваності високотемпературних елементів парових турбін, першим етапом є створення просторових аналогів у тривимірній постановці.

Далі для автоматизації вирішення задачі напружено-деформованого стану і тим самим для скорочення ресурсів на її вирішення 3D-модель клапана імпортується в програмний пакет ANSYS. Моделювання, розрахунок і аналіз напружено-деформованого стану клапана виконується з використанням методу скінченних елементів.

CAE ANSYS дає можливість аналізувати напружено-деформований стан складних деталей під час їх роботи та робити висновки про їх надійність. Це дає змогу скоротити час, що затрачується на розрахунок граничних умов теплообміну. Особливою перевагою моделювання є отримання наочного результату, що дає змогу спростити його аналіз та оцінювати результати навіть не професіоналам у сфері аналізу конструкцій.

Стандартний алгоритм проведення розрахунків такий:

1. Задаються початкові та граничні умови теплообміну (перепад тисків, швидкість, температура і т. д.).

2. Створюється кінцево-елементна сітка для геометричної моделі (для першого приближення можна використовувати сітку, яка будується в автоматичному режимі).

Даний етап, як і всі інші, дуже важливий, і помилки, допущені на цій стадії моделювання, можуть поставити під сумнів коректність усього розрахунку.

Логіка будь-якого чисельного моделювання передбачає розбиття розрахункової області на дискрети (елементи). Саме у вузлах сітки визначаються значення шуканих змінних (переважно швидкість і тиск) і накладаються граничні умови задачі.

Розбиття можна проводити різними методами. Meshing та TurboGrid є основними програмними модулями, що відповідають за генерацію сітки. За допомогою Meshing можна досить швидко розбити розрахункову область (проточну частину) на тетраедричні елементи. Це так звана неструктурована сітка. Даний сітковий генератор відрізняється дуже високою продуктивністю. Він дає змогу генерувати розрахункові сітки для різних типів аналізу

(в нашому разі – гідрогазодинаміка). Такий спосіб простий і зручний, проте похибка виконуваних розрахунків на такій сітці приблизно на 5% вище, ніж у розрахунків, побудованих на структурованих сітках. При цьому Meshing дає змогу розбити на сітку геометрію практично будь-якої складності в автоматичному режимі, що істотно заощаджує час розробника. Крім того, ANSYS Meshing містить набір інструментів для виправлення неякісної геометрії. А TurboGrid адаптована для роботи з проточними частинами просторових каналів. При цьому проточна частина автоматично розбивається на гексаедричну структуровану сітку, що дає змогу в подальшому прискорити процес розрахунку і підвищити його збіжність (точність) і стійкість. Варто зазначити, що TurboGrid має досить серйозні інструменти і можливості для більш тонкого налаштування розрахункової сітки та приведення її в задовільний стан.

3. Призначаються властивості матеріалів.

4. Налаштовується solver (без урахування стискуваності середовища або з урахуванням, стаціонарний чи перехідний процес, задається число ітерацій, відбувається налаштування збіжності, визначаються вихідні величини) і запускається розрахунок.

Особливу увагу під час розрахунку газодинаміки клапана необхідно звернути на вибір базової моделі турбулентності. ANSYS Fluent і ANSYS CFX містять у собі широкий спектр різноманітних моделей турбулентності: це RANS-моделі (осереднені по Рейнольдсу) та методи великих і від'єднаних вихорів LES і DES відповідно, а також гібридні моделі, що поєднують переваги RANS- і LES-моделювання. Найбільш популярною однопараметричною моделлю турбулентності, яка широко використовується в задачах зовнішньої аеродинаміки під час розрахунку безвідривних течій, є модель Спаларта-Алмараса. У цій моделі вихрова в'язкість визначається з одного диференціального рівняння переносу турбулентної кінетичної енергії. З уведенням поправок на кривизну, обертання і шорсткість сфера застосування цієї моделі істотно розширилася.

Але для розрахунку безвідривних течій або течій з обмеженими відривними зонами можна також використовувати і двопараметричні моделі типу $k-\epsilon$ і $k-\omega$. У першому випадку розраховується рівняння для турбулентної дисипації ϵ , у другому – для питомої швидкості дисипації турбулентної енергії ω . Для тонкого прикордонного шару модель $k-\omega$ більш точно передбачає положення точки відриву, ніж модель $k-\epsilon$. Однак під

час розрахунку внутрішніх течій модель $k-\omega$, як правило, працює гірше, ніж $k-\epsilon$. Також під час використання моделі турбулентності $k-\omega$ варто пам'ятати, що вона дуже чутлива до граничних умов у зовнішньому потоці. Якщо необхідно розрахувати анізотропну турбулентність, тобто турбулентність, що залежить від напрямку, або досліджуються нерівноважні ефекти, використовується модель Рейнольдсових напруг (Reynolds-Stress Model). Ця модель дає найбільш точні результати для складних течій із вторинними потоками, однак вимагає значно більше обчислювальних ресурсів, аніж стандартні двопараметричні моделі.

Проте, крім напівемпіричних моделей, що базуються на використанні RANS, проводяться розрахунки на основі LES (метод великих вихорів) і DES (метод відокремлених вихорів) методів. Основна ідея методу LES полягає у локальному осередненні характеристик турбулентної течії по областях із розмірами порядку фільтра: дрібномасштабна частина спектра «моделюється», а вихрові структури з розмірами, що перевищують розміри фільтра, вирішуються «точно».

Метод від'єднаних вихорів DES можна умовно назвати гібридним методом LES/RANS. Під час його використання в прикордонному шарі використовуються нестационарні рівняння Рейнольдса, тоді як метод LES застосовується у відривних зонах. LES-зони, як правило, розташовані в області турбулентних течій, де домінують великомасштабні турбулентні структури. У пристінковій області використовуються відповідні RANS-моделі. Метод DES застосовується переважно для моделювання високореїнольдсових потоків; під час моделювання внутрішніх течій точність цього методу істотно знижується. Обчислювальні витрати під час використання методу DES менші, ніж у процесі використання LES, але більші, ніж під час використання методу RANS.

Під час моделювання яскраво вираженої нестационарної течії доцільно застосовувати модель турбулентності SAS (Scale-Adaptive Simulation), яка є вдосконаленим варіантом нестационарного методу RANS (URANS) і дає змогу отримувати достовірні результати для пульсаційного складника потоку. На відміну від традиційних URANS-моделей, які дають змогу отримати тільки великомасштабні турбулентні структури, модель SAS динамічно адаптується до вирішених методом

URANS масштабів і дає змогу відстежити розвиток турбулентних структур в окремих областях течії. Таким чином, у нестационарних областях потоку SAS-модель працює подібно методу LES, а в стаціонарних областях – аналогічно RANS-методу. Завдяки постійному збільшенню продуктивності комп'ютерів і зменшенню їх вартості моделі LES і більш економічні моделі DES стали надзвичайно популярні для вирішення промислових завдань.

Підвищити точність розрахунку можна шляхом накладання більш жорстких вимог по рівнях середньоквадратичних нев'язок (Residual Target). Чим нижче значення нев'язок, тим точніше отриманий результат. Упевнене і швидке досягнення низьких рівнів нев'язок свідчить про хорошу збіжність розрахунку й якісної проточної частини.

На етапі визначення результатів розрахунку отриманий масив даних за розрахунковими даними полів температур і теплових потоків осереднено. Він дає високоточні результати і дуже інформативні та показові картини течії. Це дає змогу найбільш глибоко вивчити характер перебігу і оперативно виявити негативні явища, якщо такі мають місце. Завдяки інтеграції з розрахунковою платформою ANSYS Workbench передаються температурні поля і теплові граничні умови в ANSYS Mechanical для подальшого проведення теплових розрахунків або розрахунків напружено-деформованого стану. Підсумковим етапом чисельного моделювання в ANSYS є отримання й аналіз результатів розрахунку в CFD-Post. Проаналізувавши напружено-деформований стан, отримуємо дані для подальших розрахунків, пов'язаних із ресурсними показниками

Висновки. Отже, під час аналізу класичної методики визначення температурного та напружено-деформованого стану високотемпературних об'єктів енергетики на прикладі елементів системи паророзподілення АЕС доведено ефективність підходу, який заснований на методі скінченних елементів, що реалізовано в сучасних програмних комплексах ANSYS та SolidWorks Simulation та ін. У подальшому будуть проведені комплекси числових експериментів, спрямованих на більш докладне вивчення газодинаміки елементів паропроводів АЕС та її впливу на напружено-деформований стан, а отже, і на ресурсні показники подібного класу обладнання.

Список літератури:

1. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій: СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2004 : Нормативний документ Мінпаливенерго України. Офіц. вид. – Київ : ГРІФРЕ : М-во палива та енергетики України, 2005. 76 с.

2. Оценка индивидуального ресурса литых корпусов автоматических защитных клапанов энергоблоков мощностью 200 МВт / О.Ю. Черноусенко. *Вестник НТУ «ХПИ». Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование*. 2018. № 13. С. 26–32.

3. Черноусенко О.Ю. Расчетное исследование индивидуального ресурса корпусов ЦВД, ЦСД, корпусов стопорных клапанов и роторов К–200-130 блока 200 МВт. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ». Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование*. 2007. № 2. С. 64–70.

4. РТМ 24.020.16-73. Турбины паровые стационарные. Расчет температурных полей роторов и цилиндров паровых турбин методом электро моделирования. Москва, 1973. № ВК-002/3209. 104 с.

5. РД 10-577-03. Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций. Москва, 2003.

6. РТМ 108.021.103. Детали паровых стационарных турбин. Расчет на малоцикловую усталость. Москва, 1985. № АЗ-002/7382. 49 с.

7. Черноусенко О.Ю. Обобщение и анализ результатов расчетного исследования индивидуального ресурса корпусов и роторов ЦВД и ЦСД турбины К–200-130 блока 200 МВт. *Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование*. 2008. № 6. С. 107–111.

8. Расчетное определение малоциклового усталости высокотемпературных элементов паровой турбины мощностью 200 МВт с применением программного комплекса ANSYS И COSMOSWorks / Е.Н. Письменный и др. *Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение*. 2008. С. 188-195.

9. Антикайн П.А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 368 с.

10. Дубов А.А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования. *Теплоэнергетика*. 2003. № 11. С. 54–57.

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ТЕПЛООВОГО И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРОВОДОВ АЭС

Продление срока эксплуатации энергетического оборудования атомных станций является важной задачей для энергетики Украины. В статье проведено сравнение методов определения теплового и напряженно-деформированного состояния элементов парораспределительной системы АЭС. Отмечена целесообразность использования современных программных комплексов, основанных на методе конечных элементов, и их преимущества над традиционными методами.

Ключевые слова: атомная энергетика, клапан, граничные условия, напряженно-деформированное состояние.

ANALYSIS OF APPROACHES TO THE EVALUATION OF THERMAL AND STRESS-DEFORMED STATE OF STEAM PIPELINES ELEMENTS OF NPP

Extension of the period of operation of power equipment of nuclear power plants is an urgent need for the energy sector of Ukraine. The article deals with comparison of the methods for determining the thermal and stress-strain state of elements of the distribution system of the nuclear power plant is made. The expediency of using modern software complexes based on the method of finite elements and their advantages over classical methods is noted.

Key words: nuclear energy, valve, boundary conditions, stress-strain state.