

РЕФЕРАТ

наукової роботи

«Робочі лопатки та діафрагми останніх ступенів парових турбін великої потужності: дослідження, розрахунок, контроль, технологія»

авторів д.т.н. С. В. Альохіної, М. Г. Іщенко, Р. Б. Шерфедінова, Л. О. Сластьон

Актуальність роботи

Щорічне зростання та сталий розвиток ядерної і теплової енергетики є одним з визначальних факторів у вирішенні енергетичних проблем України. Це можливо при введенні нових потужностей, або при продовженні ресурсу, або при модернізації обладнання атомних та теплових станцій, або при реалізації всіх трьох перелічених напрямів.

На жаль, сьогодні у вітчизняній енергетиці працюють турбоустановки потужністю 200, 300, 1000 МВт, які створювались у 60-70-і роки ХХ століття для несення базових навантажень енергосистеми та забезпечення енергобезпеки України. Їх подальше використання при маневрових, напівпікових та пікових навантаженнях створило ряд проблем, пов'язаних з надійністю, маневреністю та економічністю обладнання. В контексті цього та згідно з Програмою участі АТ «Турбоатом» у поставках обладнання для АЕС України на п'ятирічний період (2018-2022 рр.) та Програмою участі АТ «Турбоатом» у поставках обладнання для АЕС України на п'ятирічний період (2020-2024 рр.), необхідно модернізувати проточні частини циліндрів парових турбін типу К-220-44, К-1000-60/1500, К-1000-60/3000 із заміною робочих лопаток. Особливу увагу при цьому було звернено на останні ступені турбін, які традиційно мають більший рівень зношення. Основними напрямками при розробці їх останніх ступенів мають бути: установка робочих лопаток та діафрагм в існуючі циліндри без заміни роторів та корпусів; підвищення економічності з метою приросту електричної потужності турбоустановок на затискачах генератора; забезпечення надійності та працездатності робочих лопаток останніх ступенів; підвищення терміну служби. Вирішення комплексу цих задач потребує

створення математичних моделей, що описують фізичні процеси в останніх ступенях циліндра низького тиску (ЦНТ), розробки методу чисельного розрахунку та всебічного опрацювання технологічних процесів і процесів контролю виготовлення робочих лопаток і діафрагм. Все це неможливе без співпраці науково-дослідних організацій та виробничих підприємств, які працюють в галузі турбобудування. Сьогодні в Україні успішним прикладом такої колаборації є спільні роботи, направлені на підвищення ефективності та конкурентноспроможності вітчизняної турбобудівної галузі, які виконують Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України (ІПМаш НАН України) та АТ «Турбоатом».

Мета роботи

Розробка моделей, методів розрахунку та технологій створення лопаток та діафрагм останніх ступенів парових турбін великої потужності атомних і теплових електростанцій для забезпечення сталого розвитку енергетики України.

Наукова новизна

Сформульовано математичну модель газодинамічних процесів в останніх ступенях ЦНТ парових турбін великої потужності, яка дозволяє враховувати просторовість та нестационарність течії.

Запропоновано метод чисельного моделювання течії в проточних частинах турбін, що використовує дискретизацію розрахункової області скінченними об'ємами та дозволяє проводити інтегрування рівнянь у часткових похідних на неструктурованих сітках.

Створено метод теплового розрахунку останніх ступенів ЦНТ по зазорах осесиметричного потоку пари, який дає можливість розраховувати потік в довільній групі ступенів при до- і надзвукових швидкостях, а також при малих об'ємних пропусках пари.

Сформовано методику розрахунку діафрагм останніх ступенів ЦНТ, яка враховує характерні риси їх напрямних лопаток, зокрема порожнистість, наявність прорізу для вологовидалення.

Розроблено технологію виготовлення зварних діафрагм останніх ступенів ЦНТ, що включає серію технологічних процесів із виготовлення тіла та обода, виготовлення бандажів та напрямних лопаток, складання решітки діафрагми, складання та зварювання решітки з тілом та ободом, термічні операції, механічну обробку, випробування і збирання.

Для виготовлення напрямних лопаток порожнистої конструкції розроблено нову технологію, що включає в себе виготовлення частин лопатки збірної конструкції: підготовка листів механічною обробкою, гнуття листів, їх збирання та зварювання листів.

Розроблено методи проектування та плани контролю якості сталевих робочих і напрямних лопаток, а також робочих лопаток з титанового сплаву Ti-6Al-4V, які охоплюють всі етапи виробництва, – від плавки металу до збирання готового виробу на технологічному диску.

Зміст роботи

Авторами розроблено нові типорозміри вихлопу із зростаючими довжинами робочої лопатки останнього ступеня з урахуванням механічних властивостей матеріалів і, більш того, АТ «Турбоатом» впровадило нові матеріали з більшою міцністю. На рис. 1 зображені робочі лопатки останніх ступенів виробництва АТ «Турбоатом» для турбін великих потужностей, відносно яких проведені дослідження в роботі.

Авторами сформульовані принципи положень, використаних при розробках серії нових останніх ступенів для турбін з різною частотою обертання:

- підвищений ступінь реактивності в кореневій зоні, що виключає появу негативних її значень навіть при істотному зменшенні об'ємної витрати через ступінь. Верхня межа ступеня реактивності вибирається на рівні, що не обумовлює значні труднощі в забезпеченні міцності робочих лопаток;

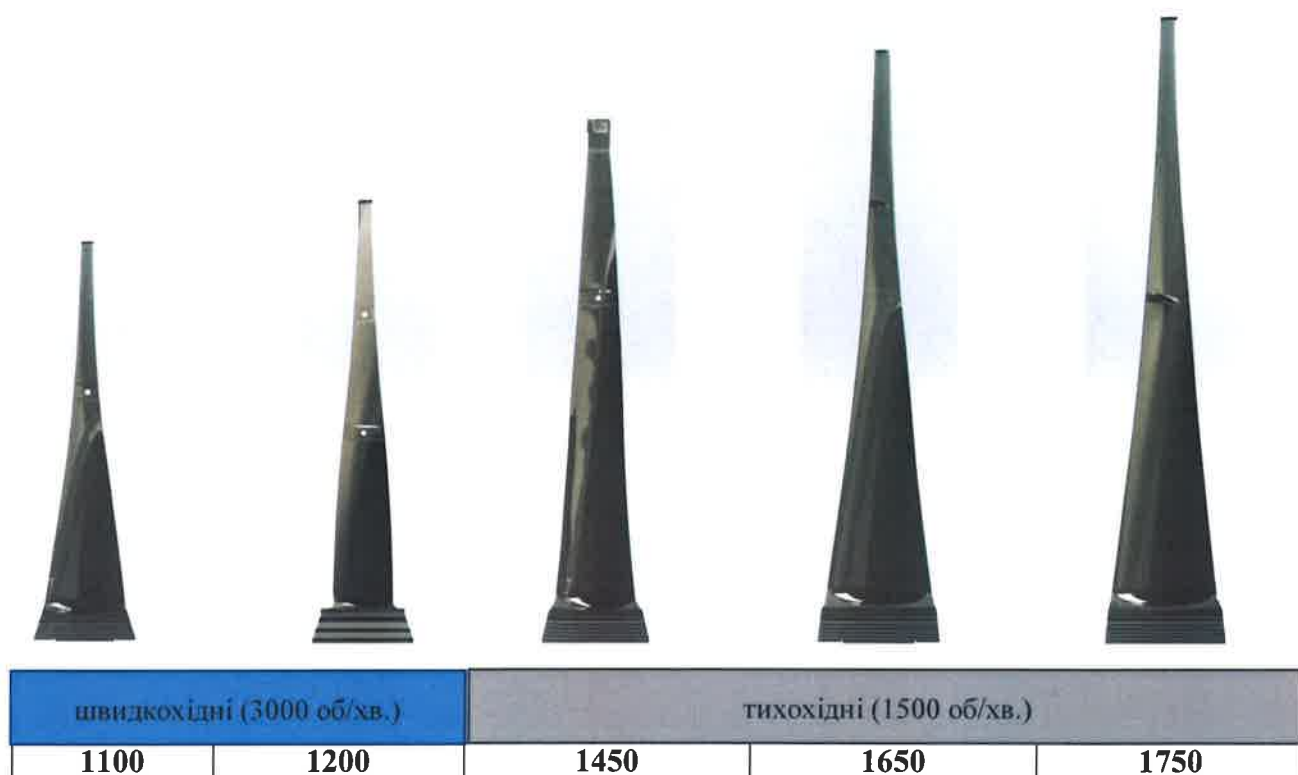


Рисунок 1 – Робочі лопатки останніх ступенів АТ «Турбоатом»

- великий розрахунковий перепад ентальпій (не менше 190 кДж/кг), допустимий з міркувань міцності і прийнятний при вибраних радіальних розмірах ступенів і помірного ступеня реактивності (50-60 %) на середньому радіусі лопаток. При зменшенні об'ємної витрати це сприяє більш пізньому переходу ступеня в вентиляційний режим, що характеризується підвищеними динамічними впливами потоку на лопатки;

- «зворотня закрутка» напрямних лопаток зі зменшенням кута виходу потоку з них від кореня до периферії, яка забезпечує поєднання ступенів реактивності біля кореня і на середньому радіусі, що не досягається в ступенях подібної віірності з традиційним «прямим закручуванням». «Зворотня закрутка» сприяє також вирішенню деяких інших питань проектування і поліпшення експлуатаційних характеристик останніх ступенів;

- збільшена перекиша між напрямною і робочою лопатками у периферійного обводу;

- газодинамічна оптимізація ступеня при частковій об'ємній витраті на виході з нього (70-80 %) для запобігання ранній появі прикореневого відриву

потокі при зменшенні об'ємної витрати пари на виході зі ступеня. При цьому вдається забезпечити раціональну форму ліній потоку і задовільну рівномірність розподілу швидкості виходу потоку зі ступеня також і на номінальному режимі.

Зазначені принципи є основою оптимізаційних газодинамічних розрахунків кожного нового останнього ступеня. В роботі викладені основи проведення газодинамічних розрахунків для чисельного дослідження просторових в'язких течій пари в проточних частинах парових турбін. При дослідженні застосовано метод, заснований на інтегруванні системи осереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса за допомогою неявної ENO-схеми Годунова; турбулентні ефекти враховуються завдяки використанню диференціальної двопараметричної моделі турбулентності SST-Ментера.

Приділено увагу методиці теплового розрахунку останніх ступенів. Задача зводиться до багаторазового розв'язання системи звичайних диференціальних і нелінійних алгебраїчних рівнянь при фіксованих значеннях кривизни і кутів нахилу меридіальних ліній потоку, а також в уточненні цих величин послідовними наближеннями. Метод має високий ступінь збіжності навіть при грубому початковому наближенні для шуканих величин. Створена на його основі програма дозволяє розраховувати потік в довільній групі ступенів при до- і надзвукових швидкостях, а також при малих об'ємних перепусках пари. За її допомогою можна розрахувати як останній ступінь, так і проміжний, забезпечивши облік радіальної нерівномірності граничних умов на вході і виході через вплив попередніх і наступних ступенів. Крім того, можливо розрахувати останні ступені з кутами горлових перерізів напрямних лопаток, які зменшуються від кореня до периферії, з підвищеним ступенем реактивності в корені при одночасному зменшенні її радіального градієнта. При цьому малі кути горлових перерізів напрямних лопаток на периферії підвищують економічність відповідних перерізів ступеня, а прийняте співвідношення кутів напрямних і робочих лопаток запобігає появі відриву потоку біля кореня лопатки. Завдяки чому було підвищено коефіцієнт корисної дії ступеня і його надійність.

Окрему увагу в роботі приділено задачі обчислення параметрів діафрагм. У загальному вигляді задача про розрахунок діафрагми ставиться таким чином. Дві концентричні напівкільцеві пластини (тіло і обід) жорстко з'єднані між собою стрижнями (лопатками). Вся система навантажена рівномірно розподіленим тиском. Лопатки, крім цього, навантажені розподіленим по її довжині коловим зусиллям. Діафрагма вважається опертою по зовнішньому діаметру. В результаті розрахунку визначаються напруження в тілі і ободі діафрагми, в напрямних лопатках, вигин діафрагми по ущільненню, а також на діаметру кореневого перерізу лопаток.

З огляду на складність конструкції діафрагм при її розрахунку, використовуються спеціальні методи механіки, в основу яких покладено теорію стрижневих систем, метод скінченних елементів тощо. Слід зауважити, що розрахунок діафрагм останніх ступенів ЦНТ потребує врахування характерних рис їх напрямних лопаток, які є порожнистою конструкцією з прорізом для вологовидалення (рис. 2).

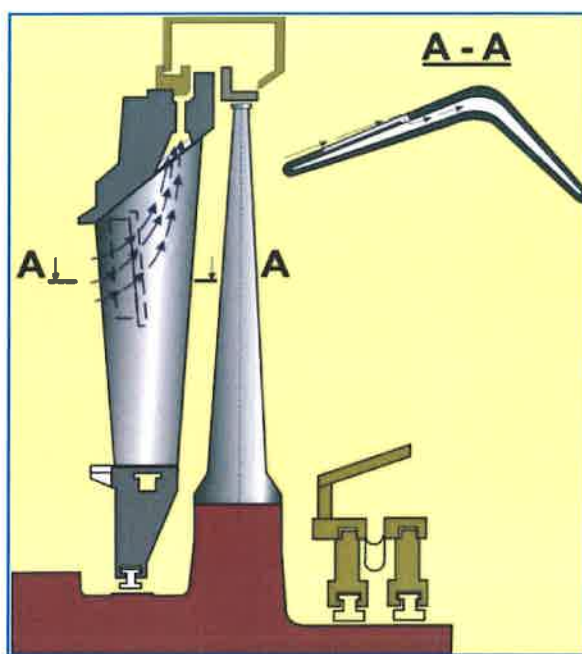


Рисунок 2 – Останній ступінь з вологовидаленням

Наявність прорізу в порожнистій лопатці перетворює її в тонкостінний стрижень відкритого перерізу, який має іншу жорсткість в порівнянні з суцільними лопатками. Для завдання у вихідних даних програми розрахунку

діафрагм фактичних значень жорсткісних характеристик лопаток діафрагм останніх ступенів виконано за допомогою методу скінченних елементів виконаний розрахунок лопатки як стрижня працюючого в умовах косоного згину.

Важливе значення для створення і виготовлення робочих лопаток останніх ступенів, що забезпечують високі характеристики міцності, вібраційні і газодинамічні показники, є технологія їх виготовлення.

Завдяки застосуванню сучасного технологічного обладнання, яке забезпечує високопродуктивну механічну обробку лопаток на верстатах з ЧПК за розробленими керуючими програмами, на виробництві АТ «Турбоатом» вдалося вирішити існуючі раніше технологічні обмеження формоутворення профільної частини лопатки і зосередити зусилля на виконанні вимог, що визначають її високі експлуатаційні якості. Плавність активної частини робочих лопаток при конструюванні досягається виконанням наступних умов:

- зміна вихідних даних впродовж радіусу має відносно плавний характер;
- зміна геометричних характеристик, по яких ведеться формування лопатки також має плавний характер;
- проектування решіток профілів у кожному розрахунковому перерізі здійснюється по єдиній методиці.

Технологічним процесом виготовлення турбіни передбачається складання лопаток останніх ступенів на роторі, технологічних дисках, а також балансування (при робочій частоті обертання) «угонні випробування» облопачених роторів у вакуумній камері, для чого АТ «Турбоатом» має в своєму розпорядженні дві розгіно-балансувальні установки.

Виготовлення та збирання деталей і вузлів напрямного апарата турбіни виконується за розробленою технологією відповідно до вимог конструкторської та технологічної документації, плану якості, стандартів і нормативно-технічної документації, які діють на підприємстві-виробнику. Технологічні процеси робіт відповідають ISO 9001. Виробнича технологічність забезпечується при виготовленні вузлів напрямного апарата на АТ «Турбоатом», монтажі, експлуатації та ремонті – на електростанціях.

Для забезпечення якості продукції, що випускається, для кожної деталі і окремих вузлів розроблені плани контролю якості, де вказана послідовність видів контролю на кожному етапі виробництва.

Важливий вплив на забезпечення надійної експлуатації лопаткового апарата надає якість збирання ступеня при монтажі. Для поліпшення цих показників на АТ «Турбоатом» розроблена технологія контрольного складання лопаток на спеціальних технологічних дисках, моделюючих штатні ротори. Ця операція, яка виконується на виробничих майданчиках підприємства, дозволяє забезпечити якість і повноту контактного прилягання в зачепленні зуб-западина цільнофрезерованих бандажів з дотриманням суворого контролю за процесом складання та доведення до вимог креслення. Враховуючи вище зазначені фактори, а також на підставі аналізу напружено-деформованого стану лопаток та заміни матеріалу з ТС-5 на Ti-6Al-4V (з підвищеними показниками зносостійкості), АТ «Турбоатом» визначив підвищений термін експлуатації зазначених лопаток до 160 000 годин, замість 100 000 годин за технічними умовами інших виробників, що суттєво підвищує ринкову привабливість вітчизняних комплектуючих турбомашин.

Практичне значення роботи

На основі багаторічних досліджень та з урахуванням конструкторсько-технологічних рекомендацій АТ «Турбоатом» створило програмний комплекс, що дозволяє за заданими і прийнятими вихідними даними розраховувати оптимальні решітки профілів останніх ступенів потужних парових турбін, які відповідають всім сучасним вимогам термогазодинаміки, міцності та вібрації.

Розробка нових і модернізованих ступенів ЦНТ із застосуванням напрямних апаратів з комбінованою шаблеподібністю соплових лопаток, в залежності від режиму роботи, забезпечує підвищення економічності останнього ступеня на 1,5-7,0 %.

Для забезпечення якості діафрагм останніх ступенів парових турбін та скорочення циклу їх виготовлення на АТ «Турбоатом» створено виробничі ділянки, які оснащені спеціальними пристроями, зварювальним обладнанням,

механообробним обладнанням, стендами для випробування та збирання, що суттєво дозволило скоротити строки та здешевити виготовлення діафрагм при виконанні серії замовлень з імпортозаміщення.

Для зменшення дії ерозії на вхідних кромках робочих лопаток виробництва АТ «Турбоатом» запропоновано і успішно застосовуються зміцнення поверхні струмами високої частоти, наплавкою електроіскровим способом сплаву Т15К6 та власним металом. Забезпечення ерозійної стійкості лопаток останнього ступеня головним чином обумовлено технічними рішеннями, спрямованими на усунення причин появи ерозії та пасивних заходів боротьби з нею.

АТ «Турбоатом» за наукової підтримки ІПМаш НАН України виконало термогазодинамічні розрахунки, розрахунки на міцність і вібрацію, що дозволило випустити конструкторську і технологічну документацію для виготовлення заготовок і остаточної обробки лопаток.





Зазначені в роботі науково-технічні розробки для модернізації існуючих турбін, імпортозаміщення робочих лопаток останніх ступенів, які вичерпали строк експлуатації, реалізовані при проектуванні, виготовленні, виконанні монтажу, пуско-налагоджувальних роботах і введенні в експлуатацію турбін К-1000-60/3000 з робочими лопатками із титанового сплаву Ti-6Al-4V виробництва АТ «Турбоатом» на енергоблоках АЕС України – ВП «Южно-Українська АЕС», блок № 3, ВП «Хмельницька АЕС», блоки № 1, 2 і ВП «Рівненська АЕС», блоки № 3, 4.

Апробація результатів дослідження та впровадження

Результати роботи викладені у 50 наукових публікаціях, зокрема у 2-х монографіях, 7 міжнародних публікаціях, що проіндексовані наукометричною базою даних SCOPUS, 5 патентах України (2 отримано, 3 подано на розгляд). За результатами роботи створено 5 технічних інструкцій, 6 технічних вимог, 1 технічні умови.

Впровадження роботи підтверджується 15 актами впровадження.
Економічний ефект від використання результатів роботи станом на кінець 2019 року складає близько 7,5 млн. грн.

Автори:

	С.В.Альохіна
	М.Г.Іщенко
	Р.Б.Шерфедінов
	Л.О.Сластьон