

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОБУДУВАННЯ
ім. А. М. ПІДГОРНОГО

КОСЬЯНОВА АННА ІГОРІВНА



УДК 621.165

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГУЛЮЮЧОГО ВІДСІКУ
ПАРОВОЇ ТУРБИНИ ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ**

Спеціальність 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі гідроаеромеханіки енергетичних машин Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор, чл.-кор. НАН України
Русанов Андрій Вікторович,
Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного
НАН України, директор ІПМаш НАН України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Усатий Олександр Павлович,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут», Міністерство освіти і науки
України,
завідувач кафедри турбінобудування;

кандидат технічних наук,
Гришин Микола Миколайович,
Акціонерне товариство «Турбоатом»,
начальник сектору.

Захист відбудеться «10» вересня 2020 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.180.02 в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10 та на веб-сайті інституту за адресою:
<http://ipmach.kharkov.ua/> спеціалізована-вчена-рада-д-64-180-02/

Автореферат розісланий «01» серпня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.180.02
доктор технічних наук, с.н.с



С. В. Альохіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Електроенергетична галузь України є економічною гарантією державного суверенітету, основою безперервного розвитку конкурентної економіки і невіддільною частиною європейського енергетичного простору. Електрогенеруючі підприємства України формувалися в 60 – 70-ті роки минулого століття і наразі біля 40 % всієї електрогенерації припадає на обладнання теплових електростанцій. На сьогодні час експлуатації майже всього обладнання ТЕС і ТЕЦ перевищує проектний ресурс роботи в 100 тис. год., а 87 % активного генеруючого обладнання вже перейшло межу подовженого ресурсу в 200 тис. год. Очевидним є той факт, що зношене обладнання теплових станцій суттєво знижує економічність енергоблоків та призводить до неефективного використання паливно-енергетичних ресурсів. Отже реалізація Енергетичної стратегії України до 2035 року потребує суттєвої модернізації та заміни парку парових турбін великої потужності вже у найближче десятиліття.

Аналіз графіків електричного навантаження енергосистеми показує, що на даний час при деякому збільшенні річного виробітку електроенергії в Україні зростає нерівномірність її споживання. Недостатність джерел вторинного регулювання призводить до того, що режими експлуатації навіть великих теплових електростанцій з блоками потужністю 200, 300 і 500 МВт характеризуються збільшенням тривалості їх роботи на знижених навантаженнях. Виходячи з цього, актуальними є підвищення їх ефективності та економічності.

Пошуку шляхів підвищення ефективності роботи парових турбін в цілому та регулюючого відсіку зокрема присвячено наукові праці великої кількості відомих вчених як в Україні, так і за її межами, серед яких Бойко А. В., Гнесін В. І., Гоголев І. Г., Дейч М. Ю., Жирицький Г. С., Зарянкін А. Ю., Кирилов І. І., Косяк Ю. Ф., Русанов А. В., Самойлович Г. С., Тарелін А. О., Трояновський Б. М., Трухній О. Д., Усатий О. П., Філіппов Г. О., Шубенко-Шубін Л. О., Шубенко О. Л., Щегляєв А. В., Boulbin F., Denton J. D, Fridh J., Lewis K. L., Stodola A., Wakeley G. та інші.

Для регулювання витрати через проточну частину найчастіше використовують системи соплового паророзподілу з коловою нерівномірністю потоку, які на сьогодні є найбільш ефективним і надійним механізмом зміни потужності турбін. Проте при такому паророзподілі пари, особливо на часткових режимах, утворюється підвищена колова нерівномірність тиску та температури, що призводить до збільшення циклічних нестационарних термогазодинамічних навантажень на елементи регулюючого відсіку. Крім того, формуються додаткові втрати енергії від вентиляції та взаємодії на краях активної дуги потоку.

На сьогодні відомі наукові праці, присвячені вивченню фізичних процесів у регулюючому відсіку турбін за допомогою експериментальних та розрахункових методів, а також підвищенню його газодинамічної ефективності. Проте вони ще не дають повної інформації необхідної для розв'язку проблеми парціального підводу з коловою нерівномірністю. Також в літературних джерелах не достатньо представлені рішення для ефективною модернізації та підвищення економічності існуючого обладнання. У більшості підходів приймається за основу існуюча система

паророзподілу і вирішуються проблеми, що виникають в даному контексті, а це може бути суттєвим обмеженням.

Наразі найбільш ефективним методом вивчення просторової структури в'язкої течії пари є чисельний експеримент, що базується на математичних моделях реальних фізичних процесів. У загальному випадку моделювання нестационарних газодинамічних течій в регулюючому відсіку потребує точного урахування взаємного положення лопаткових апаратів у кожен момент часу, що вимагає великих обчислювальних витрат та обмежує широке використання таких розрахунків в практиці проектування.

Таким чином, на сьогодні актуальними є задачі, пов'язані з удосконаленням чисельної моделі нестационарної просторової турбулентної течії пари й розробки принципово нових підходів підвищення газодинамічної ефективності регулюючого відсіку парових турбін великої потужності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Обрані в дисертаційній роботі напрями досліджень пов'язані з науковими програмами, планами і темами, які виконувалися у відділі гідроаеромеханіки енергетичних машин Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України в період з 2009 по 2019 р. в рамках науково-дослідних робіт згідно бюджетних тем № Об 4.4.11 (П-47-11) «Розробка ефективних проточних частин паротурбінних установок підвищеної маневреності» (№ ДР 0110U006342); № 34 «Розробка та удосконалення методів математичного та фізичного моделювання просторових в'язких турбулентних течій рідини і газу в елементах проточних частин парових, газових та гідравлічних машин» (№ ДР 0109U001425); «Удосконалення робочих процесів в проточних частинах енергетичних машин на основі методів математичного і фізичного моделювання просторових в'язких течій рідини і газу» (№ ДР 0114U001440) та № П-5-19 «Розробка системи соплового регулювання нового типу для парових турбін серії К-300 з метою підвищення їх економічності та надійності» (№ ДР 0119U101231). У всіх перерахованих темах автор дисертації виступала виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка і дослідження способів підвищення газодинамічної ефективності та зниження колової нерівномірності потоку в регулюючих відсіках ЦВТ парових турбін з сопловим паророзподілом.

Для реалізації поставленої мети були сформульовані такі задачі:

- реалізувати спрощену чисельну модель просторової в'язкої нестационарної течії стисливої пари, що надає можливість отримувати результати з використанням менших обчислювальних ресурсів;
- виконати аналіз структури й особливостей вирівнювання параметрів потоку в проточній частині регулюючого відсіку ЦВТ парової турбіни потужністю 325 МВт з коловим сопловим паророзподілом для основних режимів роботи та визначити напрямки газодинамічного вдосконалення;
- дослідити і встановити структуру та особливості течії в регулюючих відсіках нового типу без радіальної камери вирівнювання, зі зменшеним навантаженням на регулюючий ступінь та проміжним ступенем для оптимального розподілу теплового перепаду, зі ступенями діагонального типу, а також з

використанням направляючих апаратів, малочутливих до нерозрахункових кутів натікання;

– виконати аналіз структури й особливостей вирівнювання параметрів потоку, а також оцінити ефективність роботи регулюючого відсіку з парціальністю в радіальному напрямку для всього діапазону режимів роботи ЦВТ парової турбіни.

Об'єкт дослідження – нестационарні турбулентні газодинамічні процеси в регулюючих відсіках циліндрів високого тиску парових турбін.

Предмет дослідження – вплив конструктивних елементів на нестационарні газодинамічні процеси та енергетичну ефективність регулюючих відсіків циліндрів високого тиску парових турбін.

Методи дослідження: при вирішенні сформульованої наукової задачі використовувалися методи математичного моделювання, методи теоретичної газодинаміки, чисельний експеримент.

Наукова новизна отриманих результатів. При проведенні наукових досліджень за темою дисертаційної роботи отримані такі нові наукові результати:

– розвинуто чисельну модель просторової в'язкої нестационарної течії стисливої пари, в якій на відміну від існуючої реалізовано можливість наближеного врахування нестационарних ефектів, що дозволяє суттєво скоротити обчислювальні ресурси;

– вперше запропоновано підхід до організації парціального паророзподілу для забезпечення регулювання режимів роботи парових турбін великої потужності, що на відміну від існуючих підходів використовує підвід пари з парціальністю в радіальному напрямку через кільцеві соплові блоки;

– вперше встановлено основні закономірності впливу радіального паророзподілу на структуру потоку та газодинамічні характеристики регулюючого відсіку ЦВТ в широкому діапазоні режимів роботи парової турбіни;

– набув подальшого розвитку підхід до проектування регулюючих відсіків з коловим сопловим паророзподілом, що на відміну від існуючих підходів спирається на відмову від камери вирівнювання, зменшенню навантаження регулюючого ступеня та використання проміжного ступеня, а також в використанні ступенів діагонального типу.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані результати дозволяють підвищити газодинамічну ефективність проточної частини циліндру високого тиску парових турбін великої потужності за рахунок використання принципово нових підходів до побудови регулюючого відсіку.

Результати дисертаційної роботи використані при виборі напрямків підвищення газодинамічної ефективності проточної частини регулюючого відсіку та перших ступенів ЦВТ парової турбіни К-325-23,5 (м. Харків, Україна, акт впровадження ТА-02-221), а також в учбовому процесі на кафедрі теплоенергетики та енергозберігаючих технологій Української інженерно-педагогічної академії (м. Харків, Україна).

Запропоновано нову систему соплового паророзподілу парової турбіни. Розробка захищена патентом на корисну модель № UA 113710 C2 (Україна).

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові результати дисертаційної роботи, що подані до захисту, отримані здобувачем самостійно в період з 2010 по 2019 роки. Постановку наукових задач та обговорення отриманих результатів виконано разом з науковим керівником. Опубліковані матеріали повністю відповідають змісту дисертаційної роботи. У роботах, написаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному:

- в роботах [1, 4, 7] здобувач брала участь в постановці задач, виконала огляд літературних джерел та аналіз отриманих результатів;

- в роботах [2, 3, 10, 11] з використанням чисельного моделювання просторової в'язкої турбулентної течії здобувач виконала аналіз структури потоку в проточній частині відсіку, що складається з перших двох ступенів ЦВТ парової турбіни К-325-23,5, для основних режимів роботи; запропонувала форму лопатки направляючого апарату 2-го ступеня, малочутливого до нерозрахункових кутів натікання потоку;

- в роботах [5, 6, 12] здобувач виконала дослідження впливу колової нерівномірності від парціального підводу регулюючого відсіку для різних режимів роботи, брала участь у виконанні чисельних експериментів та виконала аналіз отриманих результатів, а також апробацію спрощеного підходу розрахунку нестационарної просторової течії;

- в роботах [7-9, 13] здобувач брала участь в розробці нового підходу по організації радіального паророзподілу для забезпечення часткових режимів роботи парових турбін великої потужності, виконала оцінку можливості реалізації часткових режимів роботи турбіни, провела чисельні експерименти та аналіз отриманих результатів;

- в роботах [14, 15] здобувач брала участь в розробці геометричної форми лопатевої проточної частини регулюючого відсіку парової турбіни потужністю 325 МВт зі ступенями діагонального типу, брала участь у виконанні чисельних експериментів та провела аналіз отриманих результатів.

Усі співавтори із задекларованим особистим внеском здобувача погодились.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень за темою дисертації доповідалися та обговорювалися на: VI Всеукраїнській науково-технічній конференції «Проблеми енергозбереження та шляхи їх вирішення» (2010 р., м. Харків); Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технічні проблеми енергетики та шляхи їх вирішення» (2011 р., м. Харків); XIV та XV міжнародній науково-технічній конференції «Удосконалення турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання» (2012 і 2015 рр., с. Задонецьке, Зміївський р-н, Харківська обл.); XVII міжнародній науково-технічній конференції «Удосконалення турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання» (2019 р., АТ «Турбоатом», ІПМаш ім. А.М. Підгорного НАНУ, м. Харків); Конференції молодих вчених та фахівців «Сучасні проблеми машинобудування» в ІПМаш НАНУ (2011, 2012, 2014 і 2015 рр., м. Харків); XXII, XXIII та XXIV міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD) (2014, 2015 і 2016 рр., м. Харків).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи опубліковано у 15 наукових працях, в тому числі 7 статей, з яких 6 – в журналах і збірках, внесених в перелік спеціалізованих видань України, де можуть публікуватися результати дисертаційних робіт, 1 – в журналі, індексованому в наукометричній базі Scopus, 1 патент України на корисну модель, 1 монографія, 6 – тези та матеріали доповідей наукових конференцій (включаючи міжнародні).

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертаційної роботи складає 188 сторінок, з них 136 сторінок основного тексту, включаючи 84 рисунки та 24 таблиць, додатки на 8 сторінках та список використаних джерел із 122 найменувань на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, визначено мету й задачі дослідження, вказано об'єкт та предмет дослідження, наведено методи дослідження, визначено наукову новизну здобутих результатів, їх теоретичне та практичне значення, наведено відомості про апробацію, а також список публікацій за темою дисертаційної роботи у спеціалізованих тематичних наукових виданнях.

В **першому розділі** наведено стислий огляд літератури за темою дисертаційної роботи та обґрунтовано вибір напрямку досліджень.

В п. 1.1 визначено напрями газодинамічного вдосконалення проточних частин регулюючих відсіків потужних парових турбін. Основу теплової енергетики України складають парові турбіни потужністю 200 – 300 МВт, що введені в експлуатацію в 60 – 70-ті роки минулого століття. Серед яких турбіни виробництва АТ «Турбоатом» з закритичними початковими параметрами пари К-300-240 і К-300-240-2. На сьогодні майже все обладнання ТЕС і ТЕЦ є застарілим, а час його експлуатації не лише перевищив проектний ресурс роботи в 100 тис. год., а й подовжений ресурс в 200 тис. год.

Аналіз графіків електричного навантаження свідчить про те, що при збільшенні річного виробітку електроенергії в Україні зростає нерівномірність її споживання. Режими експлуатації теплових електростанцій з блоками потужністю 200 і 300 МВт характеризуються як збільшенням тривалості їх роботи на знижених навантаженнях, так і використанням їх для покриття пікових навантажень (форсовані режими). Тому задача розробки систем ефективного регулювання та оптимізація параметрів турбоустановок з урахуванням роботи на часткових режимах є актуальною.

Для регулювання витрати пари через проточну частину найчастіше використовують системи соплового паророзподілу з коловою парціальністю. Характерною ознакою цього підходу є наявність соплових коробок з регулюючими клапанами, в які вмонтовані направляючі лопатки регулюючого ступеня (РС). За РС розташовується камера вирівнювання тиску (вирівнююча камера), а за нею ступені тиску ЦВТ. Введемо термін регулюючий відсік, що складається з РС, камери вирівнювання та першого ступеня тиску.

При парціальному підводі потік є нестационарним та має суттєву колову й радіальну нерівномірність, детальне вивчення впливу яких необхідне для подальшого підвищення газодинамічної ефективності ЦВТ. Вочевидь, що при зниженні колової нерівномірності перед сопловим апаратом першого ступеня тиску можна забезпечити збереження ККД цього ступеня на рівні режиму повного підводу пари. Отже, слід проводити заходи, спрямовані на зменшення нерівномірності потоку вцілому.

Розглянуто існуючі підходи підвищення газодинамічної ефективності регулюючих відсіків парових турбін на часткових режимах роботи. Для всіх напрямів характерним є використання системи паророзподілу з коловою парціальністю та вирівнюючою камерою, через що здається неможливим досягти істотного поліпшення роботи турбіни на номінальному режимі й забезпечити відсутність колової нерівномірності на часткових режимах. Організація парціального підводу з нерівномірністю у радіальному напрямку розглядається як принципово новий підхід, що заздалегідь не має проблем притаманних коловій парціальності. Його реалізація можлива за рахунок розділу соплового апарату по висоті кільцевими перегородками.

Представлено аналіз підходів пошуку оптимальної форми камери вирівнювання тиску та окремих елементів регулюючого відсіку. Відзначено, що одночасна відмова від радіальної вирівнюючої камери та зниження навантаженості регулюючого ступеня за рахунок використання проміжного ступеня тиску є актуальним напрямом підвищення газодинамічної ефективності регулюючих відсіків парових турбін з існуючою системою соплового паророзподілу.

В п. 1.2 представлено методи дослідження газодинамічних процесів в регулюючих відсіках парових турбін. Основним підходом отримання та апробації знань про просторову структуру потоку та енергетичні характеристики елементів турбомашин залишається фізичний експеримент. Проте на сьогодні ефективним методом вивчення просторової структури течії є чисельний експеримент, що базується на математичних моделях реальних процесів, таких, як осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса разом з двохпараметричною диференціальною моделлю турбулентності $k-\omega$ SST Ментера. Відзначено, що моделювання течій з просторово-часовою періодичністю в ступенях із парціальним підводом пари потребує використання нестационарної постановки задачі, що призводить до витрат значних обчислювальних ресурсів. Це робить актуальним подальший розвиток чисельної моделі з метою скорочення витрат обчислювальних ресурсів з одночасним забезпеченням достатньої точності розв'язку нестационарної задачі.

В п. 1.3 описано методіку проектування проточних частин парових турбін, до складу якої входять як методи газодинамічного розрахунку різних рівнів складності (від одновимірних, на основі емпіричних моделей, до просторових), так і методи побудови просторової форми проточної частини на основі обмеженої кількості параметризованих величин.

На базі проведеного аналізу сформульовано мету та задачі дослідження.

В **другому розділі** наведено метод проектування проточних частин парових турбін осьового типу. Детально розглянуто метод розрахунку тривимірної нестационарної в'язкої турбулентної течії стисливої перегрітої пари та аналітичні

методи побудови просторової форми проточної частини на основі обмеженої кількості параметризованих величин. Ці методи реалізовано у комплексі програм обчислювальної газогідродинаміки *IPMFlow*[®], за допомогою якого отримані результати чисельних досліджень наведені в дисертаційній роботі.

В п. 2.1 записано математичну модель просторової в'язкої турбулентної течії в елементах проточних частин парових турбін, що складається з осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, диференціальної двохпараметричної моделі турбулентності $k-\omega$ SST Ментера та термічного рівняння стану Таммана для перегрітої пари. Наведено основні перетворення рівнянь в криволінійній системі координат, характерній для розрахункових областей в проточних частинах турбомашин. Визначено початкові й граничні умови та способи їх замикання.

В п. 2.2 наведено неявну скінченно-об'ємну квазімонотонну ENO схему другого порядку апроксимації за простором та часом для чисельного інтегрування рівнянь на неструктурованих гексаедральних сітках.

В п. 2.3 наведено постановку задачі чисельного моделювання нестационарних течій в проточних частинах турбомашин. Особливу увагу зосереджено на основних кроках обміну даними на поверхні ковзання між суміжними вінцями. Показано, що необхідність враховувати змінне у часі взаємне розташування границь ковзання значно збільшує витрати обчислювальних ресурсів. Для зменшення обчислювальних витрат запропоновано *квазінестационарну* постановку, в якій нехтується зміна взаємного положення границь ковзання суміжних вінців у часі (враховується тільки одне взаємне положення). Зазначену квазінестационарну постановку реалізовано в програмному комплексі *IPMFlow* у вигляді нового типу границі ковзання між суміжними вінцями, що дозволило суттєво скоротити обчислювальні ресурси та забезпечити задовільну точність розв'язку нестационарної задачі чисельного моделювання просторової течії в регулюючому відсіку при парціальному підводі пари.

В п. 2.4 наведено результати верифікації комплексу *IPMFlow* для задач чисельного моделювання газодинамічних процесів в проточних частинах ЦВТ на прикладі парової турбіни ТК9-TW3 (рис. 1, а). Показано добре узгодження даних чисельного і натурального експериментів як за параметрами в ядрі потоку, та і за ККД (рис. 1, б), при всіх досліджуваних режимах.

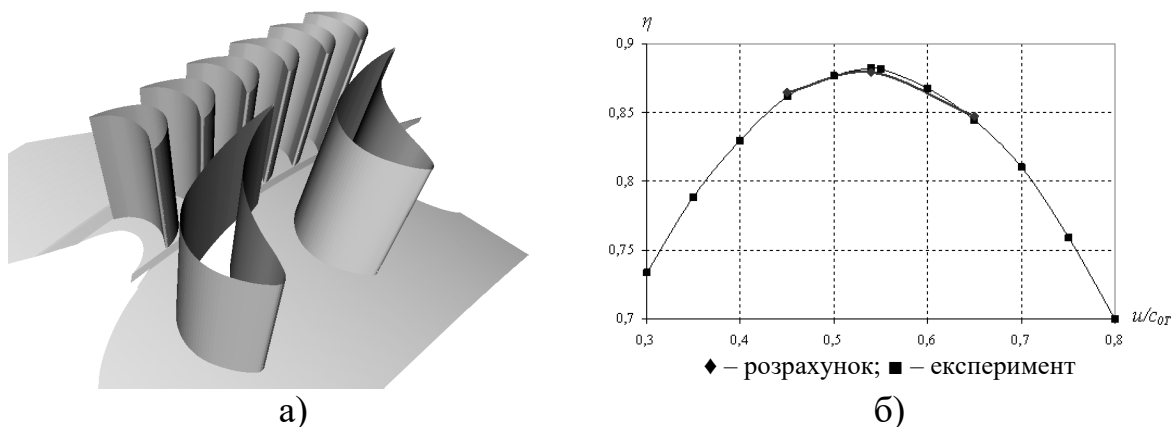


Рисунок 1 – Дослідження газодинамічних процесів в ЦВТ турбіни ТК9-TW3:
а) – вигляд розрахункової області; б) – значення ККД проточної частини

В п. 2.5 наведено блок-схему методу проектування проточних частин турбінних ступенів. Наведено метод аналітичного профілювання лопаткових вінців осьового типу на основі обмеженої кількості параметризованих величин, розроблений в роботі Русанова А.В., Пащенко Н.В. та Косьянкової А.І. Профіль лопатки описується поліномами 4-го та 5-го порядків з додатковою умовою мінімального значення максимальної кривизни.

В третьому розділі наведено результати чисельного дослідження просторової турбулентної течії в регулюючому відсіку ЦВТ парової турбіни потужністю 325 МВт та виконано оцінку ефективності використання лопаток направляючого апарату (НА), малочутливих до нерозрахункових кутів натікання.

В п. 3.1 як вихідний об'єкт дослідження розглянуто регулюючий відсік ЦВТ парової турбіни К-325-23,5 АТ «Турбоатом», що складається з регулюючого ступеня, радіальної вирівнюючої камери та першого ступеня тиску (рис. 2).

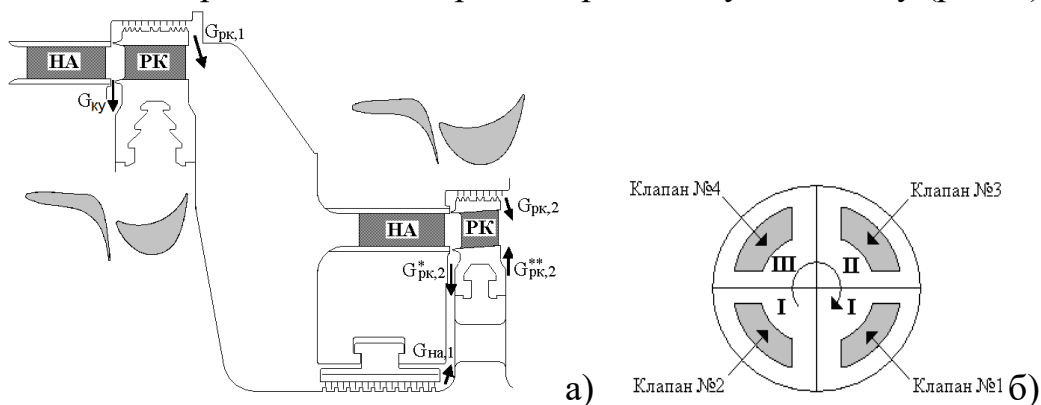


Рисунок 2 – Регулюючий відсік парової турбіни К-325-23,5:

а) – меридіональний переріз та вигляд профілів; б) – соплові коробки

Для регулювання режиму роботи використовується парціальний підвід пари через блоки клапанів та соплові коробки перед регулюючим ступенем ЦВТ. Основні геометричні характеристики ступенів регулюючого відсіку наведено в таблиці 1. Для визначення констант рівняння стану Таммана використано значення на вході та виході розрахункової області: повний тиск P_{0a} , повна температура T_{0a} та статичний тиск P . В таблиці 2 наведено граничні умови, що відповідають режимам роботи від 100 % до 30 % при парціальності від 0,4 до 0,8. В дослідженні враховано міждисківі та надбандажні перетікання пари, схематично позначені на рис. 2, б.

Таблиця 1 – Геометричні характеристики ступенів регулюючого відсіку

| Параметр | НА1 | РК1 | НА2 | РК2 |
|---|---------------------|-------|---------------------|--------|
| l/b (на D_{cp}) | 0,468 ¹⁾ | 0,577 | 0,491 ¹⁾ | 0,977 |
| D_{cp} , м | 1,182 | 1,183 | 0,8645 | 0,8675 |
| t/b (на D_{cp}) | 0,893 ¹⁾ | 0,894 | 0,732 ¹⁾ | 0,885 |
| D/l | 39,4 | 35,8 | 27,4 | 25,9 |
| Z , шт. | 52 ²⁾ | 72 | 58 | 90 |
| α_{1ef} , β_{2ef} (на D_{cp}), градус | 9,85 | 16,97 | 12,68 | 19,7 |

¹⁾ Розраховано за розміром хорди профілю ($b=64,1$ мм).

²⁾ Кількість відкритих каналів для ступеня парціальності 0,8 (всього 65).

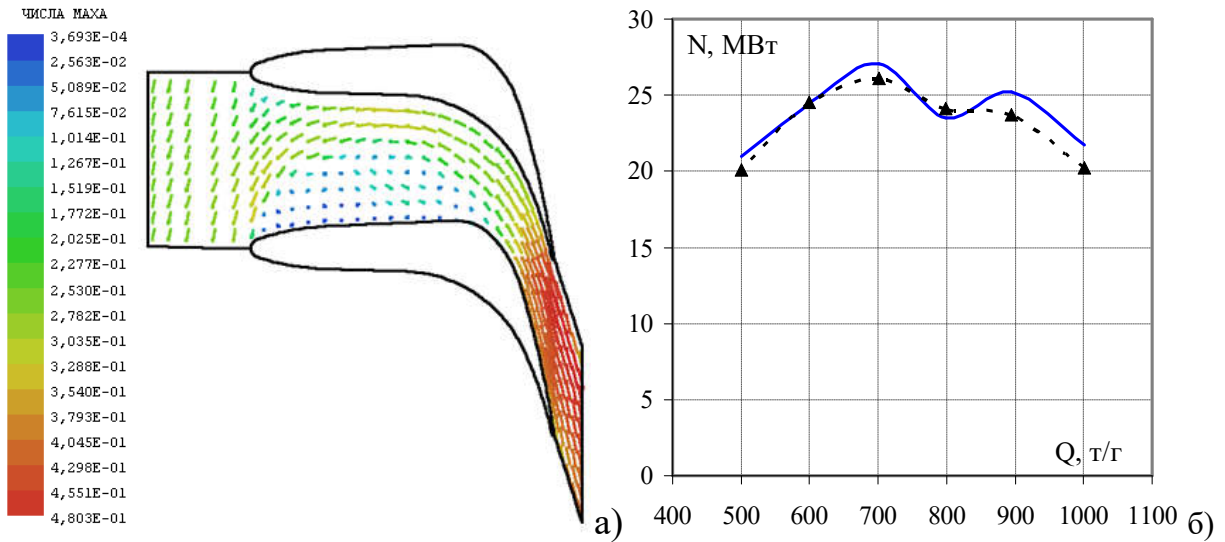
Таблиця 2 – Граничні умови для розрахунків 1-го і 2-го ступенів ЦВТ

| Параметр | Режим | | | | | | | |
|-----------------------------|----------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|
| | 100 % | 90 % | 80 % | 70 % | 65 % | 60 % | 50 % | 30 % |
| Ступінь парціальності | 0,8 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| Сектор подачі пари | I,II,III | I, II | I, II | I | I | I | I | I |
| P_{0a} перед 1-м ст., МПа | 22,73 | 22,53 | 21,4 | 22,0 | 20,565 | 19,4 | 16,1 | 9,051 |
| T_{0a} перед 1-м ст., °С | 535,4 | 535,4 | 535,4 | 535,4 | 535,4 | 535,4 | 535,4 | 475,0 |
| P_{0a} перед 2-м ст., МПа | 18,94 | 16,96 | 14,95 | 13,29 | 11,89 | 11,45 | 9,58 | 5,05 |
| T_{0a} перед 2-м ст., °С | 508,0 | 494,5 | 485,6 | 477,0 | 449,0 | 470,74 | 472,34 | 402,7 |
| P за 2-м ст., МПа | 16,58 | 14,95 | 13,14 | 11,63 | 10,822 | 9,97 | 8,31 | 4,754 |
| Витрата пари, кг/с | 277,87 | 250,0 | 222,2 | 194,4 | 180,89 | 166,7 | 138,9 | 79,47 |

В п. 3.2 представлено дослідження газодинамічних процесів, що відбуваються в регулюючому відсіку на різних режимах роботи, а також виконано оцінку ефективності використання лопаток направляючого апарату, малочутливих до нерозрахункових кутів натікання.

Для чисельного моделювання двоступінчатий відсік відображається на розрахункову область за допомогою структурованої сітки Н-типу з сумарною кількістю ≈ 2.4 млн комірок. Згущення розрахункової сітки поблизу твердих поверхонь відповідає Y^+ в діапазоні 2...6.

Аналіз отриманих розрахункових даних показав, що кут натікання потоку перед першим ступенем тиску змінюється в діапазоні значень від -60° до $+60^\circ$ (від осьового напрямку), а при номінальному режимі роботи (режим 100 %) істотно відхилений від осьового напрямку. Це спричиняє утворення значних відривів потоку розміром до половини міжлопаткового каналу в направляючому апараті (рис. 3, а). Незалежно від режиму роботи у потоці в вирівнюючій камері присутні значні вихрові зони, що призводить до зменшення газодинамічної ефективності регулюючого відсіку. Для номінального режиму втрати кінетичної енергії в 1-му ступені становлять 16,9 %, в 2-му – 16,54 %, а в двох ступенях – 16,84 %. Отриманий рівень втрат в 1-му ступені є допустимим, якщо врахувати особливість його конструкції – парціальність. Значення втрат кінетичної енергії в 2-му ступені зависоке і може бути пояснено тільки наявністю істотних відривів. На рис. 3, б) представлено порівняння потужності отриманої за розрахунками в дисертації з даними 1D-методики АТ «Турбоатом».



—▲— — одновимірна методика АТ «Турбоатом», — — розрахунок *IPMFlow*

Рисунок 3 – Результати моделювання в регулюючому відсіку турбіни К-325-23,5:

а) – вектори швидкості в НА 2ст., режим 50 %; б) – потужність відсіка

З метою збільшення газодинамічної ефективності другого ступеня розроблено нову форму циліндричної широкохордної лопатки направляючого апарата, малочутливої до нерозрахункових кутів натікання (рис. 4). Профіль створено з застосуванням методу аналітичного профілювання лопаткових вінців осьового типу, наведений в підрозділі 2.5.

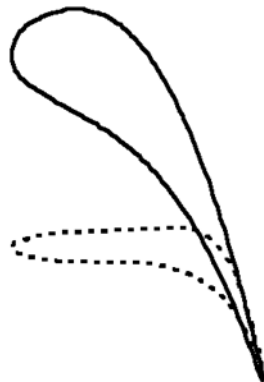


Рисунок 4 – Профіль лопатки НА2:

--- — вихідний профіль; — — модернізований профіль

Аналіз результатів показав, що розроблений профіль лопатки НА менш чутливий до нерозрахункових кутів натікання потоку. Завдяки цьому забезпечується майже безвідривне обтікання й зниження втрат кінетичної енергії у 2-му ступені в широкому діапазоні режимів роботи (рис 5).

Застосування цього НА дозволило збільшити ефективність роботи всього регулюючого відсіку ЦВТ. Так на номінальному режимі втрати кінетичної енергії зменшились для 1-го ступеня на 0,4 %, для 2-го – на 8,1 %, а в двох ступенях – на 4,2 %.

Аналогічний підхід використано для модернізації проточної частини всього ЦВТ парової турбіни К-325-23,5 в ступенях №3 – 12. Чисельне дослідження виконано для номінального режиму роботи за допомогою структурованої сітки

Н-типу з сумарною кількістю ≈ 1.64 млн комірок в одному ступені. Рівень втрат кінетичної енергії в модернізованих ступенях ЦВТ знизився на 3,8 %. Загальний коефіцієнт корисної дії ЦВТ збільшився з 85,9 до 89,7 %, а прогнозована сумарна потужність склала 108,865 МВт, що на 4,4 МВт вище, ніж у вихідній конструкції ЦВТ.

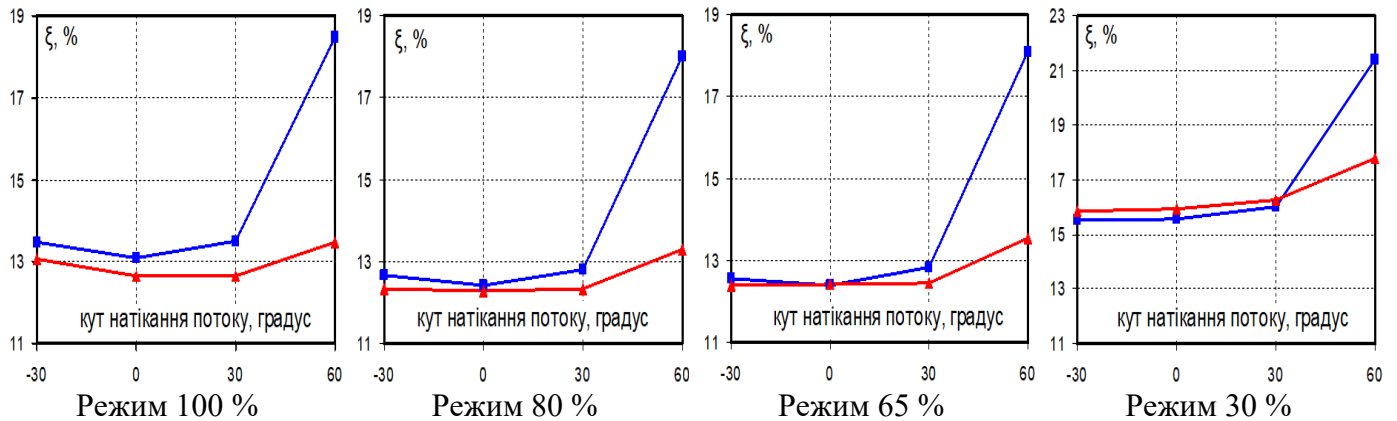
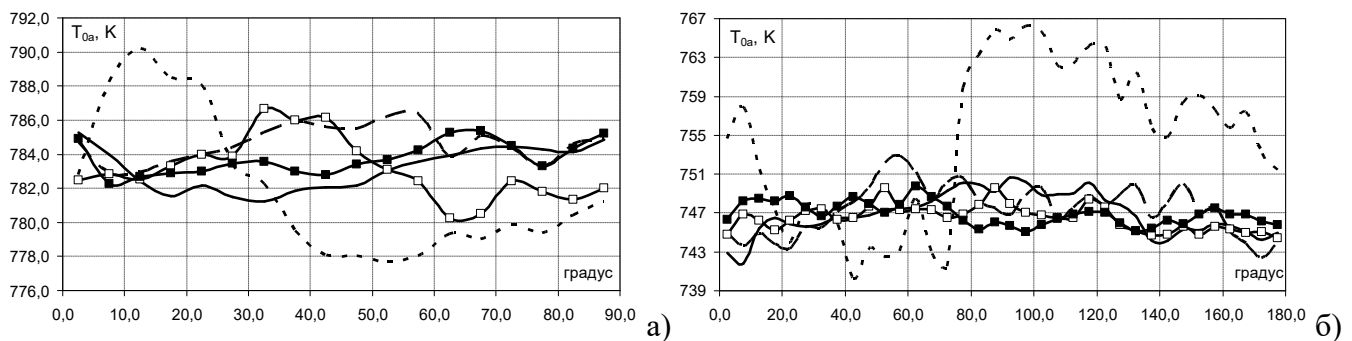


Рисунок 5 – Втрати кінетичної енергії у 2-му ступені: вихідний профіль (синя лінія), модернізований профіль (червона лінія)

В п.3.3 виконано аналіз особливостей розповсюдження та затухання нерівномірності параметрів потоку в регулюючому відсіку, спричинених коловою парціальністю, для режимів роботи зі ступенем парціальності 0,8 та 0,4. На рис. 6 наведено розподіл повної температури в коловому напрямку для різних перерізів вирівнюючої камери (нумерацію перерізів подано у відсотках ширини лопатки РК1).



--- 14,4 %; — — 221,7 %; — 396,14 %; —□— 610,4 %; —■— 838,5 %

Рисунок 6 – Розподіл повної температури в коловому напрямку, різні перерізи вирівнюючої камери:
а) – парціальність 0,8; б) – парціальність 0,4

Для оцінки вирівнювання потоку обчислено коефіцієнт нерівномірності повного тиску, повної температури й тангенціального кута в абсолютному русі, який

визначено із співвідношення $\Phi_F = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{\max} + F_{\min}} \cdot 100\%$, де F_{\max} , F_{\min} – максимальне та мінімальне значення в заданому перерізі. Встановлено, що вирівнююча камера

знижує коефіцієнт нерівномірності повного тиску до 3-х разів, а повної температури – до 6-ти разів, у порівнянні зі значеннями за робочим колесом регулюючого ступеня. Основне вирівнювання відбувається відразу ж після повороту потоку в

вирівнюючу камеру (переріз 234 %). На відміну від тиску, вирівнювання температури відбувається по всій довжині вирівнюючої камери.

При зменшенні ступеня парціальності спостерігається суттєвий вплив вирівнюючої камери на тангенціальний кут потоку перед першим ступенем тиску (рис. 7). Встановлено, що вирівнююча камера знижує нерівномірність розподілу тангенціального кута більш ніж в 5 разів. Основний вплив відбувається в області повороту за РК 1-го ступеня (до перерізу 234 %) й в конфузійній частині каналу перед НА 2-го ступеня (після перерізу 733,8 %).

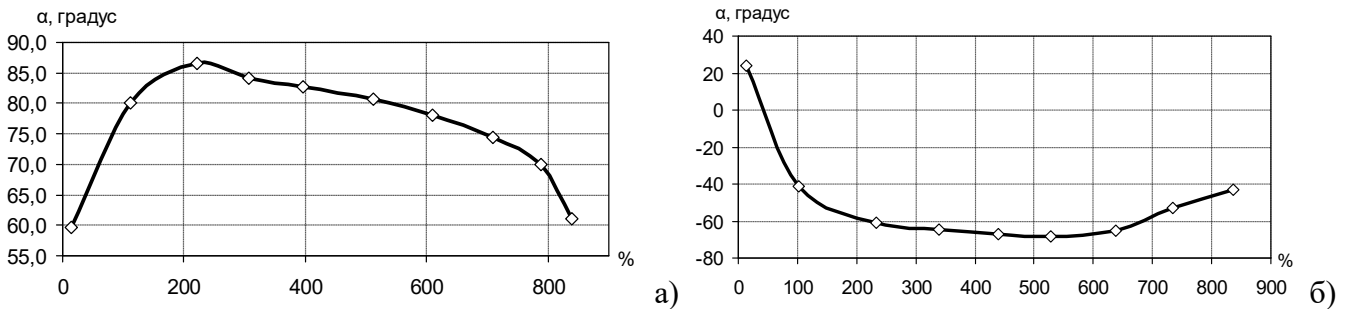


Рисунок 7 – Розподіл абсолютного тангенціального кута по довжині вирівнюючої камери: а) – парціальність 0,8; б) – парціальність 0,4

В четвертому розділі виконано дослідження регулюючих відсіків з відсутньою камерою вирівнювання тиску. Сформульовано основні положення щодо напрямків покращення регулюючого відсіку, а саме: повна або часткова відмова від використання вирівнюючої камери та застосування профілів, малочутливих до нерозрахункових кутів натікання; переміщення регулюючого ступеня на середній діаметр, що розміщений максимально близько до діаметра першого ступеня тиску; встановлення в осьовому напрямку додаткового ступеня на місце камери вирівнювання тиску для забезпечення ефективного використання теплового перепаду.

В п. 4.1 запропоновано новий підхід до організації парціального паророзподілу – радіальний паророзподіл (рис. 8). Теоретична схема регулюючого ступеня з радіальним підводом пари, що аналогічна за режимами роботи до вихідної конструкції, наведена на рис. 9.

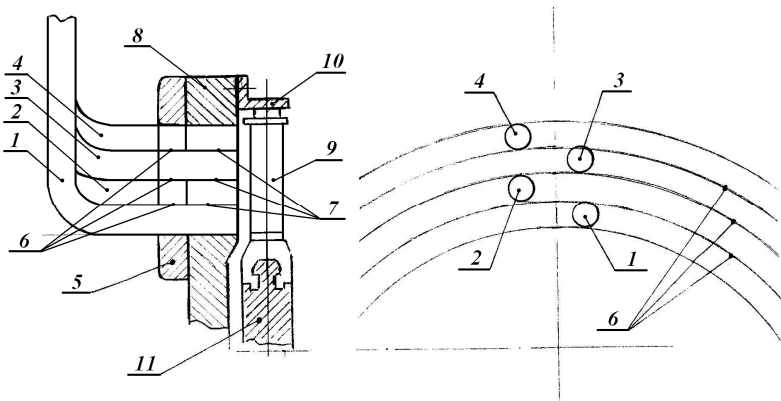


Рисунок 8 – Схема радіального паророзподілу

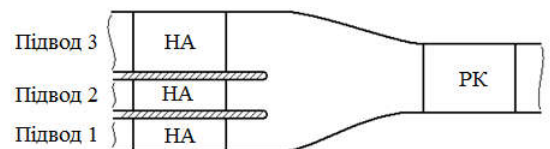


Рисунок 9 – Схема РС

В системі соплового паророзподілу парової турбіни паропроводи від регулюючих клапанів 1-4, які підводять пару до груп сопел за паророзподільною

камерою 5, розміщених перед РК регулюючого ступеня, паророзподільна камера і сопловий апарат 8 регулюючого ступеня розділені перегородками 6-7 на кільцеві області, що являють собою самостійні соплові блоки без закритих каналів. Використовуючи методику проектування проточної частини турбіни (п. 2.5) знайдено основні геометричні та газодинамічні характеристики ступенів за умови досягнення максимального значення потужності при збереженні розмірів вихідного регулюючого відсіку (табл. 3). Для забезпечення часткових режимів при збереженні висоти вихідної лопатки НА1, радіальний паророзподіл реалізовано за допомогою використанням трьох кільцевих областей з наступними висотами: 10,0 мм коренева, 6,7 мм середня та 16,7 мм верхня області. Розглянуто як спрощену постановку задачі без урахування реальної товщини кільцевих роздільників, так і з товщиною роздільників 3 мм (рис. 10).

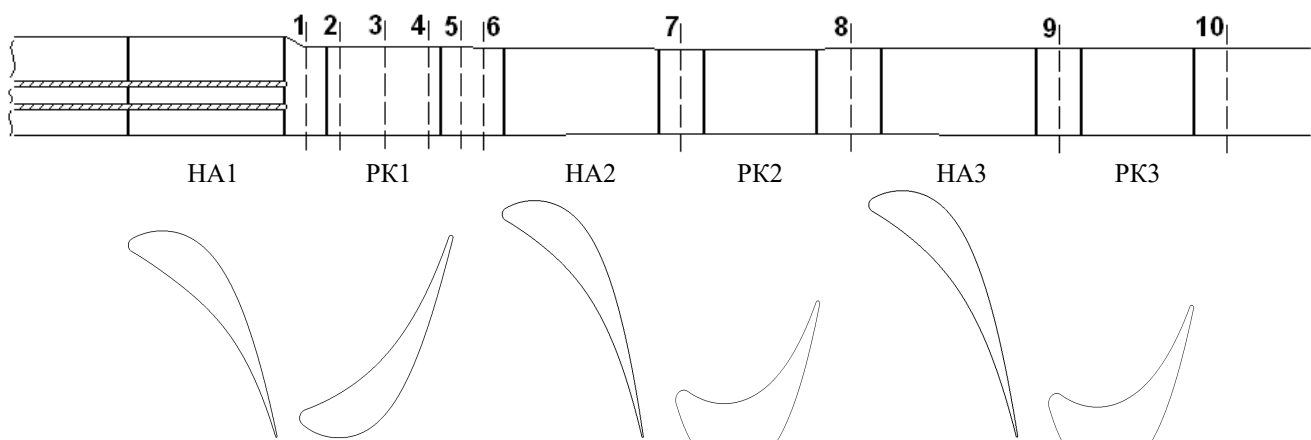


Рисунок 10 – Меридіональний переріз та вид профілів лопаток регулюючого відсіку ЦВТ парової турбіни потужністю 325 МВт

Таблиця 3 – Геометричні характеристики ступенів регулюючого відсіку

| Параметр | НА1 | РК1 | НА2 | РК2 | НА3 | РК3 |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| l/b (на D_{cp}) | 0,557 | 0,759 | 0,550 | 0,730 | 0,540 | 0,752 |
| D_{cp} , м | 0,8675 | | | | | |
| t/b (на D_{cp}) | 1,135 | 1,148 | 1,262 | 0,911 | 1,262 | 0,911 |
| D/l | 25,97 | 25,97 | 27,02 | 27,02 | 26,21 | 26,21 |
| Z , шт. | 40 | 54 | 36 | 68 | 36 | 68 |
| $\alpha_{1ef}, \beta_{2ef}$ на D_{cp} , градус | 16,2 | 17,4 | 12,1 | 19,0 | 12,9 | 20,1 |

Чисельне дослідження виконано за допомогою структурованої сітки Н-типу з сумарною кількістю ≈ 3.28 млн комірок для режимів роботи 100 %, 80 %, 65 % та 30 % (див. табл. 2). Для аналізу особливостей вирівнювання параметрів потоку і поля швидкостей в регулюючому відсіку, спричинених радіальною парціальністю, обчислено коефіцієнт нерівномірності в перерізах, позначених штрихованою лінією на рис. 10. Аналіз отриманих результатів показав, що найбільшу нерівномірність мають розподіли параметрів повного та статичного тисків. Робоче колесо регулюючого ступеня знижує нерівномірність в 15 – 25 разів для тиску та в 7 – 9 разів для інших компонент у порівнянні зі значеннями на вході, що значно ефективніше за радіальну вирівнюючу камеру вихідної конструкції (рис. 11, 12).

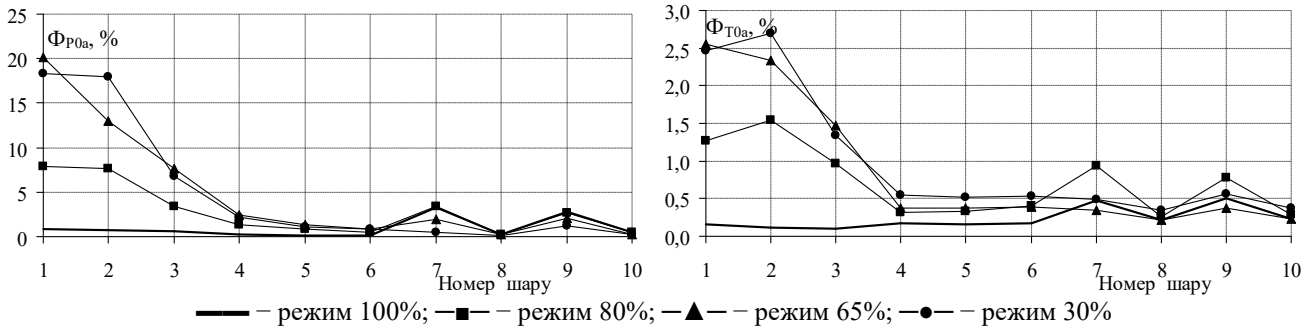


Рисунок 11 – Розподіл коефіцієнта нерівномірності в різних перерізах

Нерівномірність потоку в ступенях 2 та 3 кількісно та якісно подібна на всіх режимах роботи, тобто основні процеси вирівнювання зосереджені лише в робочому колесі регулюючого ступеня. Вплив товщини кільцевих роздільників полягає в збільшенні аеродинамічного сліду та спричиняє додаткові 0,7–0,8 % втрат кінетичної енергії потоку й зменшення потужності на 0,1–0,2 МВт залежно від режиму роботи. Для основних режимів роботи збільшення потужності складає понад 2 МВт, при цьому втрати кінетичної енергії менші на 11 % від вихідного регулюючого відсіку.

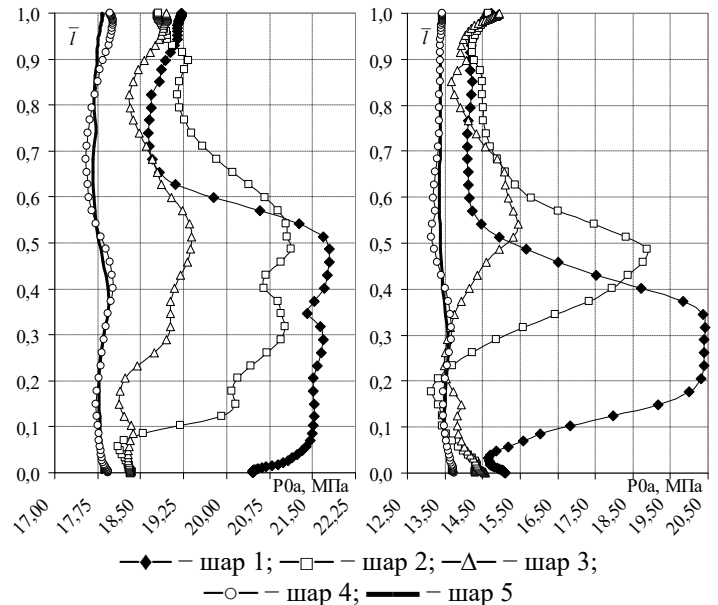


Рисунок 12 – Структура потоку в перерізах РК РС

В п 4.2 запропоновано геометричну форму проточної частини регулюючого відсіку парової турбіни потужністю 325 МВт для реалізації основних напрямків покращення ЦВТ при існуючій системі соплового паророзподілу з коловою нерівномірністю. Об'єкт дослідження складається з регулюючого ступеня та двох ступенів тиску діагонального типу з направляючими апаратами, малочутливими до нерозрахункових кутів натікання (рис. 13). Використовуючи методику проектування проточної частини турбіни (п. 2.5) знайдено основні геометричні та газодинамічні характеристики ступенів за умови досягнення максимального значення потужності при збереженні розмірів вихідного регулюючого відсіку (табл. 4). Подачу пари виконано з різним ступенем парціальності залежно від режиму, а саме:

- 100 % – 0,8 (48 канали відкриті / 60 каналів НА1);
- 90, 80 % – $\approx 0,6$ (35 канали відкриті / 60 каналів НА1);
- 70, 60 и 50 % – $\approx 0,4$ (22 канали відкриті / 60 каналів НА1).

На всіх режимах роботи враховано міждисккові та надбандажні перетікання пари, схема яких зображена на рисунку 13. Для чисельного моделювання відсік відображається на розрахункову область за допомогою структурованої сітки Н-типу з сумарною кількістю ~ 3.2 млн комірок.

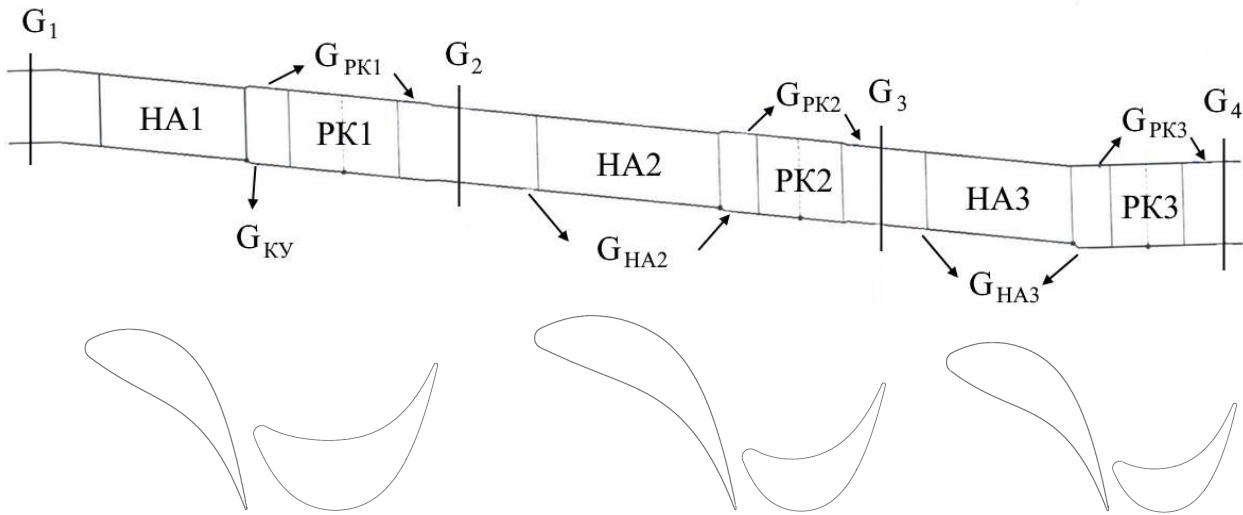


Рисунок 13 – Меридіональний переріз та вид профілів лопаток регулюючого відсіку ЦВТ парової турбіни потужністю 325 МВт

Таблиця 4 – Геометричні характеристики ступенів регулюючого відсіку

| Параметр | HA1 | PK1 | HA2 | PK2 | HA3 | PK3 |
|--|------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| l/b (на D_{cp}) | 0,71 | 0,938 | 0,803 | 0,895 | 0,763 | 0,891 |
| D_{cp} , м | 0,9547 | 0,9391 | 0,9062 | 0,8935 | 0,8701 | 0,868 |
| t/b (на D_{cp}) | 0,592 | 0,666 | 0,508 | 0,78 | 0,58 | 0,75 |
| D/l | 15,92 | 20,87 | 12,09 | 25,53 | 14,51 | 28,94 |
| Z , шт. | 48 ¹⁾ | 92 | 60 | 92 | 60 | 108 |
| α_{1ef} , β_{2ef} , градус (на D_{cp}) | 14,0 | 19,0 | 15,4 | 20,0 | 15,7 | 19,0 |

¹⁾ Ступінь парціальності 0,8.

Аналіз результатів дослідження показав, що картина натікання не має істотних відривів потоку. ККД проточної частини регулюючого відсіку ЦВТ за результатами виконаних досліджень становить 91,0 % на номінальному режимі без урахування втрат на клапанах та 85,8 % із урахуванням втрат на клапанах. Збільшення газодинамічної

ефективності у порівнянні з

вихідною конструкцією становить від 6 до 10 % за коловим ККД, а також від 1 до 2 МВт потужності в залежності від режиму роботи.

В п. 4.3 сформульовано напрямки та задачі для подальшого вдосконалення регулюючих ступенів ЦВТ парових турбін великої потужності, що спираються на запропоновані підходи.

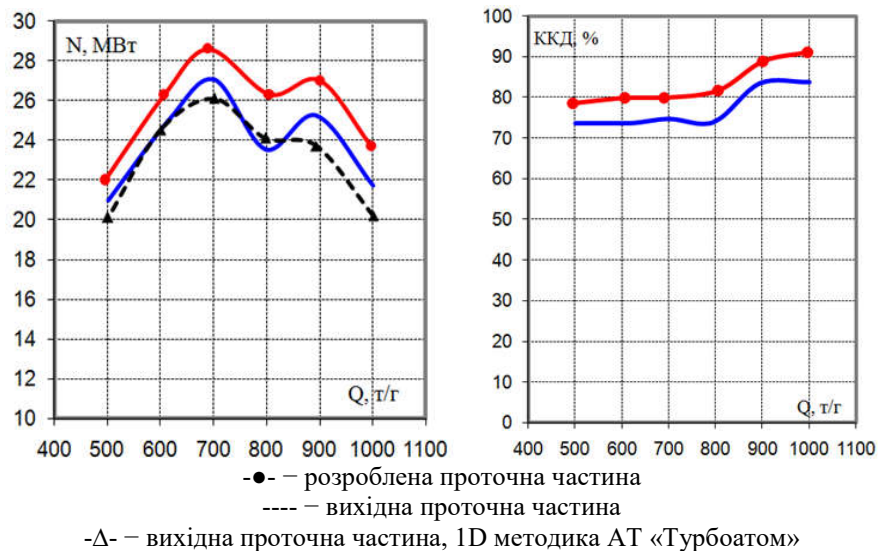


Рисунок 14 – Порівняння енергетичних характеристик

ВИСНОВКИ

Дисертаційну роботу присвячено розв'язку важливої науково-практичної задачі, а саме розробці та дослідженню способів підвищення газодинамічної ефективності та зниженню колової нерівномірності потоку в регулюючих відсіках ЦВТ парових турбін з сопловим паророзподілом. Основні результати та висновки:

1. Сформульовано математичну модель та реалізовано в програмному комплексі *IPMFlow* спрощену квазінестаціонарну постановку розрахунку нестаціонарних просторових турбулентних течій пари, основне припущення якої полягає у знехтуванні зміною взаємного положення границь ковзання між суміжними вінцями у часі. Наведено результати верифікації методу для задач чисельного дослідження газодинамічних процесів в проточних частинах відсіків циліндра високого тиску парової турбіни. Показано задовільне узгодження експериментальних та розрахункових даних.

2. Виконано чисельне дослідження впливу соплового паророзподілу з коловою парціальністю на просторову структуру потоку регулюючого відсіку ЦВТ парової турбіни потужністю 325 МВт. Проведено аналіз газодинамічної ефективності роботи перших ступенів ЦВТ для основних режимів парціального підводу пари.

3. Розроблено форму широкохордної лопатки направляючого апарату першого ступеня тиску, малочутливу до нерозрахункових кутів натікання потоку в діапазоні -60 до $+60$ градусів від осьового напрямку, застосування якої дозволило знизити втрати кінетичної енергії в відсіку на $4,2\%$.

4. Виконано аналіз особливостей вирівнювання параметрів потоку в регулюючому відсіку, спричинених коловою парціальністю. Показано, що вирівнююча камера знижує коефіцієнт нерівномірності повного тиску до 3-х разів, а повної температури – до 6-ти разів, порівняно зі значеннями за робочим колесом регулюючого ступеня.

5. Вперше запропоновано новий підхід до організації парціального паророзподілу – радіальний паророзподіл, на основі якого розроблено конструктивне рішення регулюючого відсіку для парової турбіни К-325-23,5 без вирівнюючої камери і з трьома кільцевими камерами. Розробка захищена патентом на корисну модель.

6. Встановлено степінь впливу радіальної парціальності на газодинамічну ефективність регулюючого ступеня та перших ступенів тиску. Найбільша залежність спостерігається для регулюючого ступеня й істотно менша в ступені тиску. Рівень ККД 2-го ступеня тиску суттєво не залежить від режиму роботи.

7. Встановлено вплив режиму роботи на процеси вирівнювання нерівномірності потоку в проточній частині регулюючого відсіку з радіальним паророзподілом. Показано, що основні процеси вирівнювання відбуваються в робочому колесі регулюючого ступеня, яке знижує коефіцієнт нерівномірності в $15-25$ разів для тиску та в $7-9$ разів для інших компонент у порівнянні зі значеннями на вході. Використання регулюючого відсіку з радіальним паророзподілом забезпечує збільшення потужності ЦВТ на $1-2$ МВт та зниження

втрат кінетичної енергії на 6–11 % для основних режимів порівняно з вихідною конструкцією.

8. Розроблено проточну частину регулюючого відсіку К-325-23,5, що складається з трьох ступенів діагонального типу та використовує лопатки, малочутливі до нерозрахункових кутів натікання. Радіальна камера вирівнювання тиску відсутня. ККД розробленого регулюючого відсіку становить 91,0 % на номінальному режимі без урахування втрат на клапанах та 85,8 % із урахуванням втрат на клапанах. Коловий ККД збільшився на 6–10 %, а потужність відсіку на 1–2 МВт залежно від режиму роботи.

9. Результати роботи використані АТ «Турбоатом» (м. Харків) при виборі напрямків підвищення газодинамічної ефективності проточної частини регулюючого відсіку та перших ступенів ЦВД парової турбіни К-325-23,5, а також в учбовому процесі на кафедрі теплоенергетики та енергозберігаючих технологій Української інженерно-педагогічної академії (м. Харків), що підтверджено відповідними актами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Науково-технічні основи моделювання і проектування проточних частин енергетичних турбоустановок / А. В. Русанов, В. І. Гнесін, О. М. Хорєв та ін.: за заг. ред. чл.-кор. НАН України А. В. Русанова: монографія. – Харків: Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного, 2019. – 386 с.

2. Повышение эффективности работы 2-й ступени ЦВД турбины К-325-23,5 при нерасчетных углах обтекания потока / А. В. Русанов, Е. В. Левченко, В. Л. Швецов, А. И. Косьянова // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. № 3. С. 12–18. ISSN 2078-774X.

3. Повышение газодинамической эффективности первых двух ступеней ЦВД паровой турбины К-325-23,5 / А. В. Русанов, Е. В. Левченко, В. Л. Швецов, А. И. Косьянова // Компрессорное и энергетическое машиностроение. Сумы, 2011. № 1(23). С. 28–32. ISSN 2413-4554.

4. Газодинамическое совершенствование проточной части цилиндра высокого давления паровой турбины К-325-23,5 / А. В. Русанов, А. И. Косьянова, П. Н. Сухорезький, О. Н. Хорєв // Наука та інновації. Київ, 2013. № 1. С. 33–40. ISSN 1815-2066.

5. Русанов А. В., Косьянова А. И., Косьянов Д. Ю. Исследование структуры потока в регулирующем отсеке ЦВД паровой турбины К-325-23,5. // Вестник двигателестроения. Запоріжжя, 2014. № 2. С. 90–95. ISSN 1727-0219.

6. Русанов А. В., Косьянова А. И., Косьянов Д. Ю. Исследование структуры потока в регулирующем отсеке ЦВД паровой турбины К-325-23,5 на режиме парциальности 0,4. // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков: ХАИ, 2015. № 9/126. С. 75–80. ISSN 1727-7337.

7. Русанов А. В., Косьянова А. И., Косьянов Д. Ю. Разработка нового способа парциального парораспределения для обеспечения частичных режимов работы

мощных паровых турбин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Харьков, 2015. № 6(8). С. 24–28. ISSN 1729-3774.

8. Русанов А. В., Косьянов Д. Ю., Косьянова А. И. Исследование пространственного потока пара в регулирующем отсеке с радиальным парциальным парораспределением // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков: ХАИ, 2016. № 7(134). С. 43–48. ISSN 1727-7337.

9. Патент на корисну модель № UA 113710 C2 (Україна). Система соплового парозподілу парової турбіни /МПК (2016.01) F24D 3/18(2006.01) F24H 4/02(2006.01) F01K 25/02(2006.01) / Русанов А. В., Шубенко О. Л., Сухінін В. П., Швецов В. Л., Косьянова А. І.; Заявл. № а 2016 08387. Дата подання 29.07.2016, Опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3, 4 с.

10.Повышение эффективности работы 2-й ступени ЦВД турбины К-325-23,5 при нерасчетных углах обтекания потока / А. В. Русанов, Е. В. Левченко, В. Л. Швецов, А. И. Косьянова // Проблемы энергосбережения Украины и пути их решения: тезисы докл. VI Всеукраинской научно-технической конференции. Харьков, 2010. С. 4.

11.Косьянова А. И. Повышение газодинамической эффективности первых двух ступеней ЦВД паровой турбины К-325-23,5 на частичных режимах работы // Тез. докл. конф. молодых учёных и специалистов, Харьков: Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, 2012. С. 56.

12.Русанов А. В., Косьянова А. І., Косьянов Д. Ю. Дослідження роботи регулюючого відсіку ЦВД парової турбіни К-325-23,5 на частковому режимі експлуатації // XXIII Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD-2015), НТУ «ХПІ», Харків, 2015. Ч. 1. С. 290.

13.Косьянова А. И. Новый способ организации парциального парораспределения паровых турбин // Тез. докл. конф. молодых учёных и специалистов, Харьков: Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, 2015. С. 28.

14.Розробка системи соплового регулювання нового типу для парових турбін серії К-300 з метою підвищення їх економічності та надійності / Русанов А. В., Швецов В. Л., Пащенко Н. В., Чугай М. О., Кожешкурт І. І., Косьянова А. І. [електронний ресурс] // Удосконалювання енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання: тези доповідей XVII МНТК. Харків: АТ «Турбоатом», Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, 2019. 1 електрон. опт. диск.

15.Русанов А. В., Косьянова А. І., Косьянов Д. Ю. Дослідження процесів вирівнювання потоку в регулюючому відсіку з радіальним парціальним паророзподілом [електронний ресурс] // Удосконалювання енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання: тези доповідей XVII МНТК. Харків: АТ «Турбоатом», Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, 2019. 1 електрон. опт. диск.

АНОТАЦІЯ

Косьянова А. І. Підвищення ефективності регулюючого відсіку парової турбіни великої потужності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.05.16 – «Турбомашини та турбоустановки» (142 – енергетичне машинобудування) – Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, Харків, 2020.

Дисертація присвячена дослідженню газодинамічних процесів в проточному тракті регулюючого відсіку (регулюючий ступінь, камера вирівнювання тиску (вирівнююча камера) та перший ступінь тиску) циліндра високого тиску (ЦВТ) парових турбін великої потужності з сопловим паророзподілом, а також розробці та дослідженню способів зниження колової нерівномірності в зазначених елементах проточної частини.

Для дослідження газодинамічних процесів використано чисельний експеримент на базі математичної моделі просторової стисливої в'язкої турбулентної нестационарної течії водяної пари. Модель заснована на чисельному інтегруванні осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса з коректно поставленими граничними умовами. Для врахування турбулентних ефектів застосовується двопараметрична диференціальна модель $k-\omega$ SST Ментера. В основу методу чисельного інтегрування покладено квазімонотонну ENO-схему підвищеної точності із вбудованою ітераційною процедурою вирішення одновимірної задачі розпаду довільного розриву. Відображення фізичної області на розрахункову виконується за допомогою структурованих або неструктурованих різницевих сіток з гексаедральними комірками, що задовольняють ряду додаткових вимог до кроку сітки і характеру згущень сітки біля твердих поверхонь.

Запропоновано спрощену квазінестационарну постановку розрахунку нестационарних просторових течій пари. Основним припущенням якої є нехтування зміною взаємного положення границь ковзання між суміжними вінцями у часі. Встановлено, що це дозволяє суттєво скоротити використання обчислювальних ресурсів при забезпеченні задовільної точності розв'язку нестационарної задачі. Достовірність отриманих результатів підтверджується широкою апробацією методу дослідження, а також порівнянням з даними фізичного експерименту й результатами наукових праць інших авторів.

Виконано чисельне дослідження просторової в'язкої течії в регулюючому відсіку ЦВТ парової турбіни потужністю 325 МВт для основних режимів роботи з ступенем парціальності від 0.8 до 0.4. Встановлено, що кут натікання потоку перед першим ступенем тиску змінюється в широкому діапазоні значень, а при номінальному режимі роботи істотно відхилений від осьового напрямку. Це спричиняє утворення значних відривів потоку розміром до половини міжлопаткового каналу в направляючому апараті. Незалежно від режиму роботи у потоці в вирівнюючій камері присутні значні вихрові зони, що призводить до зменшення газодинамічної ефективності регулюючого відсіку. Виконано аналіз особливостей розповсюдження та згасання нерівномірності параметрів потоку в регулюючому відсіку, спричинених коловою парціальністю. Показано, що вирівнююча камера знижує коефіцієнт нерівномірності повного тиску до 3-х разів, а

повної температури – до 6-ти разів, порівняно зі значеннями за робочим колесом регулюючого ступеня. Найбільший ступінь вирівнювання спостерігається на початку вирівнюючої камери. При зменшенні ступеня парціальності спостерігається суттєвий вплив вирівнюючої камери на тангенціальний кут потоку перед першим ступенем тиску.

За результатами аналізу фізичних процесів у регулюючому відсіку сформульовано основні положення щодо напрямків його покращення, а саме: повна або часткова відмова від використання вирівнюючої камери та застосування профілів, малочутливих до нерозрахункових кутів натікання; переміщення регулюючого ступеня на середній діаметр, що розміщений максимально близько до діаметра першого ступеня тиску; встановлення в осьовому напрямку додаткового ступеня на місце камери вирівнювання тиску для забезпечення ефективного використання теплового перепаду.

Запропоновано спосіб підвищення газодинамічної ефективності проточної частини за рахунок використання широкохордних лопаток направляючого апарату, малочутливих до нерозрахункових кутів натікання в широкому діапазоні. Запропоновано геометричну форму лопатки, що забезпечує більш сприятливе обтікання та майже сталі втрати кінетичної енергії в першому ступені тиску для кутів натікання від -60° до 60° (від осьового напрямку). Застосування цього направляючого апарату дозволило зменшити втрати кінетичної енергії в регулюючому відсіку на 4,2 % для номінального режиму роботи. Аналогічний підхід застосовано для модернізації всієї проточної частини ЦВТ. Рівень втрат кінетичної енергії в модернізованих ступенях ЦВТ знизився на 3,8 %. Загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) ЦВТ збільшився з 85,9 до 89,7 %, а прогнозована сумарна потужність на 4,4 МВт вище, ніж у вихідній конструкції ЦВТ. Такий підхід не розв'язує проблем викликаних парціальним паророзподілом з коловою нерівномірністю, а саме підвищеної колової нерівномірності тиску та температури, які призводять до збільшення циклічних нестационарних аеродинамічних навантажень на лопатки та інші елементи проточної частини.

Для принципового вирішення проблем колової нерівномірності вперше запропоновано новий підхід до організації парціального паророзподілу – радіальний паророзподіл. Виконано попередню оцінку можливості забезпечення основних режимів роботи парової турбіни з його використанням. Розглянуто конструктивне рішення регулюючого відсіку парової турбіни потужністю 325 МВт без вирівнюючої камери та з паророзподільною камерою й сопловим апаратом регулюючого ступеня, розділеним коловими камерами в радіальному напрямку, що дозволяє підводити пару до робочого колеса без внесення колової нерівномірності в потік.

Виконано аналіз особливостей розповсюдження та затування нерівномірності параметрів потоку в регулюючому відсіку, спричинених радіальною парціальністю. Показано, що робоче колесо регулюючого ступеня знижує коефіцієнт нерівномірності в 15 – 25 разів для тиску та в 7 – 9 разів для інших компонент у порівнянні зі значеннями на вході. Встановлено, що нерівномірність потоку в ступенях 2 та 3 кількісно і якісно подібна для всіх режимів роботи, тобто основні процеси вирівнювання зосереджені в робочому колесі регулюючого ступеня. Для

номінального режиму збільшення потужності складає понад 2 МВт, при цьому втрати кінетичної енергії менші на 11 % від вихідного регулюючого відсіку. Встановлено, що збільшення товщини кільцевих роздільників до 3 мм призводить до підвищення на 0,7 – 0,8 % втрат кінетичної енергії потоку та зменшення потужності на 0,1 – 0,2 МВт залежно від режиму роботи.

Для реалізації зазначених напрямків удосконалення при існуючій системі соплового паророзподілу з коловою нерівномірністю запропоновано геометричну форму лопатевої проточної частини регулюючого відсіку парової турбіни потужністю 325 МВт. Об'єкт дослідження складається з регулюючого ступеня та двох ступенів тиску діагонального типу з направляючими апаратами, малочутливими до нерозрахункових кутів натікання. Радіальна камера вирівнювання тиску відсутня. ККД регулюючого відсіку становить 91,0 % на номінальному режимі без урахування втрат на клапанах та 85,8 % із урахуванням втрат на клапанах. Для всіх режимів роботи спостерігається підвищення газодинамічної ефективності у порівнянні з вихідною конструкцією. Коловий ККД збільшився на 6 – 10 %, а потужність відсіку – на 1 – 2 МВт залежно від режиму роботи.

Ключові слова: парова турбіна, циліндр високого тиску, регулюючий ступінь, вирівнююча камера, ступінь тиску, діагональний ступінь, колова парціальність, радіальний паророзподіл, турбулентна течія

ABSTRACT

Kosianova A. I. Increase the efficiency of high power steam turbine regulating compartment – As a manuscript.

Thesis for the scientific degree of the Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) by specialty 05.05.16 – Turbo-Machines and Turbine Installations (142 – Power Machine Building), A. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The focus of the thesis is an investigation of gas-dynamic processes in the regulating compartment flowing part (control stage, surge chamber and first stage of pressure) of high power steam turbine high-pressure cylinder with nozzle partial-arc admission. It also deals with research and development of circumferential flow non-uniformity decreasing approaches in the mentioned flow part items.

Numerical analysis is used as the primary method of gas-dynamic processes investigation of unsteady three-dimensional compressible turbulent steam flows. Numerical model is based on Reynolds averaged Navier-Stokes equations and robust two-equation eddy-viscosity Menter's SST κ - ω turbulence model with properly set boundary conditions. Numerical scheme is second order of accuracy by space and time Godunov's method, which uses a high-resolution ENO reconstruction and iterative solver of Riemann problem. Physical domain discretization is performed using hexahedral structured and unstructured meshes that meet the requirements for a mesh step size and near walls thickening.

The quasi-unsteady schema is proposed for numerical modeling of unsteady three-dimensional turbulent steam flows. The main aspect is assumption to neglect the change of the relative position in time for sliding boundaries between adjacent rows. It has been

found to significantly reduce computing resources while ensuring satisfactory quality of the unsteady solution. The reliability of the obtained results is confirmed by a wide approbation of the research method, as well as by comparison with the data of the physical experiment and other researches results.

A numerical study of the three-dimensional turbulent flow processes in the results regulating compartment flowing part at high pressure steam turbine with a capacity of 325 MW was performed for all operation modes with partial admission value between 0.4 and 0.8. It is established that tangential angle of the flow before the first pressure stage varies in a wide range of values and is significantly deviated from the axial direction for the nominal operation mode. This causes significant flow separation which takes up to a half blade channel in cascade vanes. Regardless of the operation mode, the flow in the surge chamber contains significant secondary currents and flow separations, which causing reduction of the gas-dynamic efficiency of the regulating compartment flowing part. The analysis of alignment and pulsations from circumferential partiality of steam flow parameters in a regulating compartment flowing part is provided. It is shown that the surge chamber reduces a coefficient of total pressure non-uniformity up to 3 times and a coefficient of total temperature non-uniformity up to 6 times, comparing with values at the surge chamber inlet. The maximal alignment is observed at the beginning of the surge chamber. When partiality level decreases, there is a significant effect of the surge chamber on the tangential flow angle near first pressure stage inlet. It could be seen from significant deviation of the flow angle at the inlet and outlet.

Using results of physical processes analysis at the regulating compartment flowing part there were formulated main provisions regarding improvement directions, namely: full or partial refusal from surge chamber usage; using blades that are insensitive to non-optimal flow angles; to lower the control stage blades to the first pressure stage average diameter; placing of an additional stage in the axial direction at the surge chamber location for ensuring effective use of the thermal differential.

An approach to increase gas-dynamic efficiency of the regulating compartment flowing part was proposed which is based on usage of wide-chord blades of the guide apparatus, insensitive to wide range of non-optimal fluid flow angles. The shape of the blade is created, which provides a more regular flow and almost same kinetic energy losses level in the first pressure stage when a tangential angle between -60 and 60 degrees (from the axial direction). Usage of this guide-vane allowed to decrease the losses of kinetic energy in a regulative compartment on 4,2 % for the nominal operating mode. A similar approach has been applied to the entire high pressure cylinder flowing part modernization. Kinetic energy losses are decreased by 3.8% for every modernized stage. Total efficiency of entire high pressure cylinder flowing part is increased from 85.9 to 89.7 % as well as total capacity increased by 4.4 MW with respect to original design. This approach does not solve any problems of partial-arc admission with circumferential non-uniformity, namely increased circular non-uniformity of pressure and temperature, which cause cyclic non-stationary aerodynamic loads increasing on the blades.

To solve these problems fundamentally, new approach of radial partial steam admission was proposed for the first time and named "radial partiality". An assessment of the possibility to apply it for all operating modes of the high power steam turbine was performed at the first step. The constructive decision of a regulating compartment flowing

part for a steam turbine with a capacity of 325 MW without a surge chamber was developed. It uses new type of steam distribution chamber with a control stage's nozzle device, separated by circular chambers in the radial direction.

The analysis of the flow parameters alignment and pulsations from radial partiality is provided for a regulating compartment flowing part. It is shown that impeller at the control stage reduces a coefficient of pressure non-uniformity up to 15-25 times and other field components non-uniformity coefficients up to 7-9 times, comparing with values at the stage inlet. It is established that the flow non-uniformity at the pressure stages 2 and 3 is similar quantitatively and qualitatively for all operating modes, i.e. the main equalization processes are concentrated only in the control stage impeller flowing part. For the nominal mode, the power increase is more than 2 MW, while the kinetic energy losses are less by 11 % from the original control stage flowing part design. It was found that increasing thickness of circular chambers to 3 mm causes additional 0.7–0.8 % loss of kinetic energy of the flow and decrease in power by 0.1–0.2 MW depending on the operating mode.

To implement main provisions regarding improvement directions using current partial-arc admission nozzle system with circumferential non-uniformity, the geometric shape of the regulating compartment flowing part is proposed for high power steam turbine with a capacity of 325 MW. The research object consists of a control stage and two pressure stages of diagonal type and with guide apparatus, insensitive to wide range of non-optimal fluid flow angles. There is no radial surge chamber. The efficiency of the regulating compartment is 91.0 % in nominal mode without taking into account the losses on the valves and 85.8 % taking into account the losses on the valves. A gas-dynamic efficiency is increased comparatively to the original regulating compartment flowing part design for all operating modes. Depending on the operation mode a circular efficiency factor is increased on 6 – 10 % and the capacity of the compartment on 1 – 2 MW.

Keywords: steam turbine, high-pressure cylinder, control stage, surge chamber, pressure stage, diagonal stage, partial-arc admission, radial partial admission, turbulent flow.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0.9. Тир. 100 прим. Зам. № 191-20.
Підписано до друку 18.07.2020. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (057) 758-01-08, (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.

СТИЛЬ-ИЗДАТ[®]
ТИПОГРАФІЯ
www.stil-izdat.com