

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут проблем машинобудування

ім. А. М. Підгорного

БАБАЄВ АРТЕМ ІВАНОВИЧ



УДК 621.165

**ВПЛИВ ПАРОРОСПОДІЛУ
НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ТУРБІН ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ**

Спеціальність 05.05.16 – Турбомашини та турбоустановки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертація є рукопис.

Робота виконана у відділі моделювання та ідентифікації теплових процесів Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України

Науковий керівник:

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Колодяжна Любов Володимирівна,
Інститут проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного НАН України,
провідний науковий співробітник
відділу гідроаеромеханіки енергетичних машин

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Черноусенко Ольга Юрївна,
Національний технічний університет
«Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри теплоенергетичних
установок теплових та атомних електростанцій;

кандидат технічних наук, професор
Касілов Віктор Йосипович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри парогенераторобудування

Захист відбудеться «29» листопада 2018 р. о 14⁰⁰ 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. Дмитра Пожарського 2/10.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Дмитра Пожарського, 2/10.

Автореферат розісланий «26» жовтня 2018 р.

В. о. вченого секретаря спеціалізованої
вченої ради, Д 64.180.02 доктор технічних наук,
старший науковий співробітник

 Д. Х. Харламπίді

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Ефективність виробництва електричної енергії, яка ще тривалий час буде генеруватися в основному на теплових (ТЕС) і атомних електростанціях (АЕС), в значній мірі залежить від ефективної роботи паророзподілу турбоустановки.

Для сучасних конструкцій потужних парових турбін (ПТ) ТЕС і АЕС зниження тиску при течії робочого тіла в проточному тракті паророзподілу досягає 5,0 % від початкового тиску перед стопорним клапаном, що значно впливає на значення теплового перепаду, який спрацьовується в турбіні. Зменшення втрати тиску в проточному тракті паророзподілу веде до збільшення спрацьованого теплового перепаду в турбіні та супроводжується збільшенням виробленої електроенергії без додаткової витрати палива.

Також відзначається проблема зниження ефективної роботи паротурбінної установки в процесі експлуатації через абразивний знос.

В результаті абразивного зносу елементів проточного тракту паророзподілу та проточної частини лопаточного апарата турбіни скорочується їх міжремонтний період експлуатації в 2-3 рази, а також відбувається зниження коефіцієнта корисної дії паротурбінної установки, яке в середньому за кожні 5 років може досягати 0,4 %.

Таким чином, пошук шляхів підвищення газодинамічної ефективності проточного тракту паророзподілу, а також зниження абразивного зносу проточного тракту паротурбінної установки є актуальним та практично значущим завданням, що визначило напрямок досліджень дисертаційної роботи.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відділі математичного моделювання та ідентифікації теплових процесів Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України в рамках комплексних науково-технічних робіт згідно бюджетних тем «Моделювання, ідентифікація та оптимізація теплових процесів в об'єктах енергетики з метою вирішення завдань енергоресурсозбереження та підвищення надійності їх роботи» (№ ДР 0115U001091), «Розробка протиерозійних заходів з метою підвищення ресурсу робочих лопаток воложнопарових ступенів турбін великої потужності» (№ ДР 0116U005113) де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є наукове обґрунтування зменшення втрат енергії робочого тіла та підвищення надійності ПТ за рахунок вдосконалення газодинамічних процесів, які протікають в елементах паророзподілу ПТ.

Для реалізації поставленої мети були сформульовані такі задачі:

1) Сформувати математичну модель та обрати чисельний метод дослідження газодинамічних процесів в тракті паророзподілу ПТ.

2) Провести чисельне дослідження газодинамічних процесів в проточному тракті паророзподілу ПТ та оцінити вплив на рівень економічності та надійності ПТ наступних параметрів:

- структури потоку, сформованого в проточному тракті клапана на ефективну роботу послідовних елементів проточної частини турбіни;
- вплив конструкції клапана на нестационарність течії робочого тіла в його проточному тракті;
- вплив геометричних характеристик клапанного каналу на структуру потоку в проточному тракті клапана та рівень втрат енергії робочого тіла.

3) Провести дослідження, щодо пошуком раціональних конструкцій СК та РК ПТ, що забезпечують високі показники ефективності та надійності.

4) Запропонувати підхід до проектування пристрою для захисту проточного тракту паротурбінної установки від абразивного зносу.

Об'єкт дослідження – газодинамічні процеси в проточному тракті паророзподілу ПТ.

Предмет дослідження – вплив газодинамічних процесів на енергетичну ефективність та динамічну надійність елементів паророзподілу ПТ.

Методи дослідження – математичне моделювання тривимірної стаціонарної та нестационарної течії в'язкої перегрітої пари та повітря.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

- вперше визначено вплив структури течії в тракті РК на рівень втрат енергії робочого тіла у вхідному патрубку (ВП) та сопловому апараті (СА) першого ступеня циліндра турбіни;
- вперше визначено вплив одностороннього бічного підведення пари в клапанну коробку для різних форм профільної поверхні основної запірної чаші клапану на рівень втрат енергії робочого тіла та рівень динамічних навантажень на робочу поверхню основної запірної чаші;
- вперше визначено вплив зміщення осі підвідного патрубка в сторону віддалення від верхньої кромки сидла клапана для різних геометричних параметрів клапанної коробки на структуру парового потоку та рівень втрат енергії робочого тіла в проточному тракті клапана;
- на основі чисельних досліджень набула подальшого розвитку методика проектування СК та РК, яка враховує вплив геометричних співвідношень вхідного відсіку проточного тракту клапанів на їх показники ефективності та надійності.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані результати дозволяють підвищити ефективність ПТ за рахунок зниження рівня втрат енергії робочого тіла та підвищення рівня надійності паророзподілу турбоустановки шляхом як виконання малозатратних модернізацій обладнання, що знаходиться в експлуатації, так і при розробці нових проектів конструкцій ПТ.

Результати роботи використані при розробці проектів модернізації паророзподілу ПТ К-200-130 та К-800-240 «Турбоатом» (м. Харків).

Запропоновано новий пристрій для захисту проточного тракту ПТ від абразивного зносу. Розробка захищена патентом.

Особистий внесок здобувача. Опубліковані матеріали повністю відповідають змісту дисертаційної роботи. У роботах, написаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному: здобувач брав безпосередню участь в постановці завдання дослідження, виконав огляд джерел літератури та аналіз результатів [1, 2]; в роботах [3, 5-7] здобувачеві належить постановка задачі, формулювання математичної моделі об'єкта дослідження, рішення задачі й аналіз отриманих результатів; в роботі [8] автором виконано чисельне дослідження та отримані основні висновки; в роботі [9, 10] здобувач брав безпосередню участь в постановці завдання дослідження, в підході до вирішення завдання, сформулював математичну модель об'єкта дослідження, виконав чисельне дослідження та аналіз результатів; роботи [4, 11, 12] написані здобувачем самостійно.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень за темою дисертації доповідалися та обговорювалися на: XV та XVI міжнародній науково-технічній конференції «Удосконалення енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання» (2015 і 2017 рр., с. Задонецьке, Зміївський р-н, Харківська обл.), XI, XII і XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування» (2015, 2016 і 2017 рр., м. Харків); Конференції молодих вчених та фахівців «Сучасні проблеми машинобудування» в ІПМаш НАНУ (2015 і 2016 рр., м. Харків).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 12 друкованих робіт, з яких 5 статей у спеціалізованих фахових виданнях України, які входять до переліку рекомендованих МОН та міжнародну реферативну базу Ulrich's Periodicals Directory, 1 патент України, 2 статті у наукових журналах України, 4 роботи – матеріали конференції.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, основної частини, що складається з 5 розділів, висновків, списку використаних джерел з 89 найменувань та 4 додатків. Матеріал викладено на 187 сторінках машинописного тексту, основного тексту – 127 сторінок, має 84 рисунків та 17 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, показано наукову новизну та практичне значення результатів, наведено інформацію про публікації, апробацію результатів дослідження на наукових форумах, зв'язок роботи з проектними розробками по створенню турбоагрегатів, та власний внесок здобувача.

У першому розділі наведено огляд науково-технічних публікацій стосовно дослідження газодинамічних процесів в проточному тракті

паророзподілу потужних ПТ, зокрема, проточному тракці СК та РК, а також розробці конструкції пристрою, призначеного для зниження абразивного зносу проточного тракту ПТ. Приведено оцінку впливу значення втрат енергії робочого тіла в проточному тракці паророзподілу та абразивного зносу на показники економічності ПТ. Проаналізовано особливості відомих конструкцій пристроїв для зниження абразивного зносу ПТ, а також конструкцій та режимів експлуатації елементів паророзподілу сучасних ПТ.

В результаті проведеного аналізу визначено, що дослідження газодинамічних процесів в проточному тракці паророзподілу ПТ доцільно проводити чисельними методами для типової конструкції СК та РК кутового типу з одностороннім бічним підведенням парового потоку в клапанну коробку з урахуванням ймовірних режимів експлуатації клапанів.

Аналіз досліджень, спрямованих на боротьбу з абразивним зносом тракту паророзподілу та проточної частини турбіни, показав, що для збереження ефективності ПТ доцільно використання пристрою для зниження абразивного зносу шляхом видалення з тракту підведення пари твердих частинок окалини і ґрата, що забезпечує низький рівень втрат енергії робочого тіла.

На основі аналізу стану проблем підвищення рівня газодинамічної ефективності елементів паророзподілу ПТ сформульовано основні завдання для їх вирішення.

У другому розділі наведено математична модель течії газу та чисельний метод дослідження газодинамічних процесів в проточному тракці елементів паровпуску ПТ та верифікація методу з даними експериментів.

В якості основного методу дослідження використано чисельний метод математичного моделювання тривимірної стаціонарної та нестаціонарної течії в'язкої перегрітої пари й повітря, що базується на використанні усереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса в поєднанні з напівемпіричною моделлю турбулентності $k-\omega$ SST та методу розв'язання на базі контрольного об'єму. Достовірність отриманих результатів підтверджується результатами верифікації використаного методу дослідження з даними експериментів РК циліндру високого тиску ПТ К-300-240 та стопорно-регулюючого (СРК) клапану циліндру високого тиску ПТ К-1000-60/1500 «Турбоатом».

В якості основних величин для зіставлення прийнято розподіл статичного тиску уздовж профільної поверхні сідла та запірної чаші клапана та наведений коефіцієнт витрати клапана

$$q = \frac{G}{G_*} = f(\bar{h}, \varepsilon), \quad (1)$$

де G_* – витрата робочого тіла через клапан при критичному режимі течії; G – дійсна витрата через клапан; $\bar{h} = h/d_n$ – відносне відкриття клапана, що визначається як відношення величини підйому основної запірної чаші до діаметру її посадки на сідло; $\varepsilon = P_2/P_0^*$ – відносний тиск, що

визначається як відношення статичного тиску за дифузornoю частиною сідла до повного тиску на вході в клапанну коробку.

Витрати робочого тіла при критичному режимі течії визначаються за формулою

$$G_* = F_n \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \sqrt{\frac{P_0^*}{V_0^*}}, \quad (2)$$

де F_n – площа, визначена по діаметру посадки; k – показник ізоентропи; V_0^* – питомий об'єм на вході в клапан.

Проведено математичне моделювання газодинамічних процесів в проточному тракті РК ПТ К-300-240 для відносного підйому клапана $\bar{h} = 0,0536$, $\bar{h} = 0,1342$ та $\bar{h} = 0,224$. Для кожного відносного підйому клапана досліджено 4 режими, які визначаються значенням відносного тиску на клапан $\varepsilon = 0,5; 0,8; 0,9; 0,95$. Встановлено, що максимальна відносна похибка у визначенні наведеного коефіцієнту витрати для моделі РК не перевищує 10,2 %. Відносна похибка по розподілу тиску уздовж обводів чаші клапана не перевищує 5,2 % та 12,7 % для поверхні сідла. Максимальна відносна похибка у визначенні наведеного коефіцієнта витрати для моделі СРК ПТ К-1000-60/1500 для 4-х досліджених режимів не перевищує 10,7 %.

В результаті верифікації використаного методу дослідження встановлено, що для отримання основних інтегральних характеристик клапана найбільш ефективним рішенням є вирішення задачі в осісиметричній постановці при використанні тетраедричної сітки з призматичним підслоєм.

У третьому розділі наведено результати газодинамічних досліджень структури потоку в проточному тракті паровпуску циліндра ПТ та результати дослідження впливу елементів конструкції клапана на рівень втрат енергії робочого тіла та нестационарні характеристики парового потоку.

Для визначення впливу структури парового потоку, сформованого в проточному тракті РК, на ефективність подальших елементів проточної частини ПТ виконано чисельне дослідження газодинамічних процесів у паровпускному тракті ПТ К-200-130 для моделей ізольованих відсіків проточного тракту (рис. 1): відсік РК-ВП-СА, відсік ВП-СА і відсік СА.

Вибір розрахункових режимів визначався на підставі припущення про значний вплив відносного відкриття РК на формування структури парового потоку у відсіку. Вихідні дані для досліджених режимів наведено в табл. 1.

В якості основних величин для аналізу прийнято:

– коефіцієнт втрат кінетичної енергії в соплах

$$\zeta_c = 1 - \frac{1 - \left(P_{1c} / P_0^* \right)^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \left(P_{1c} / P_0^* \right)^{\frac{k-1}{k}}}, \quad (3)$$

де P_0^* – повний тиск на вході в сопла; P_1^* – повний тиск за соплами; P_{1c} – статичний тиск за соплами;

– коефіцієнта нерівномірності повного тиску в обраному перерізі

$$\chi_{P^*} = \frac{P_{\max}^* - P_{\min}^*}{\overline{P^*}}, \quad (4)$$

де $P_{\max(\min)}^*$ – максимальне (мінімальне) локальне значення повного тиску;

$\overline{P^*}$ – осереднене по витраті значення повного тиску;

– коефіцієнт внутрішніх втрат енергії

$$\zeta_{\text{вн}} = \frac{P_0^* - P_2^*}{0,5 \cdot (P_0^* - P_0 + P_2^* - P_2)}, \quad (5)$$

де P_0^* – повний тиск на вході в елемент; P_0 – статичний тиск на вході;

P_2^* – повний тиск на виході; P_2 – статичний тиск на виході.

Результати досліджень представлено на рис. 2-4.

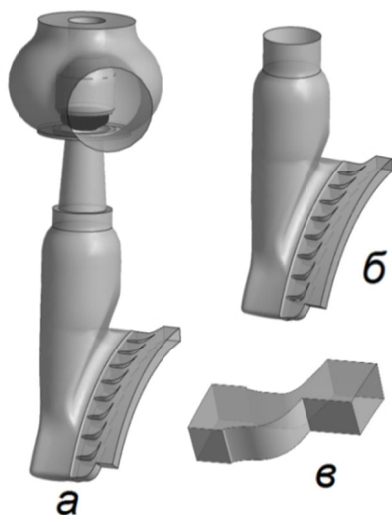


Рис. 1 – Модель проточного тракту досліджуваного відсіку: а – РК-ВП-СА; б – ВП-СА; в – СА

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Режим $\bar{h}$		
	0,064	0,137	0,192
Витрата пари на вході, кг/с	33,3	62,60	51,30
Ентальпія повна на вході, кДж/кг	3447,8	3447,8	3447,8
Степінь турбулентності на вході, %	5	5	5
Повний тиск на вході, МПа	3,643	7,992	9,896
Робоче тіло	В'язка перегріта пара		

В результаті чисельних досліджень визначено, що сумарні втрати енергії робочого тіла при спільній роботі цих елементів перевищують втрати при їх ізольованій роботі. Основною причиною підвищення рівня втрат енергії, значення яких для соплового апарату може зрости на 25% (рис. 2), є наявність нерівномірності параметрів вхідного потоку (рис. 3), сформованого у передуючому РК. Аналогічні результати отримані для ВП (рис. 4).

Для визначення впливу елементів конструкції клапана на показники економічності та надійності на першому етапі проведено чисельне дослідження нестационарної течії пари для моделей ізольованого проточного тракту бездифузорового клапанного каналу при рівномірному розподілі газодинамічних параметрів на вході.

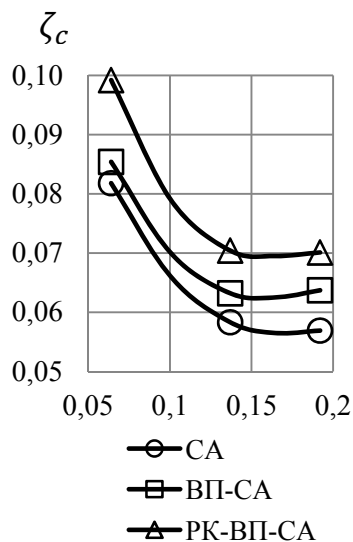


Рис. 2 – Коефіцієнт втрат в соплах при роботі у відсіках

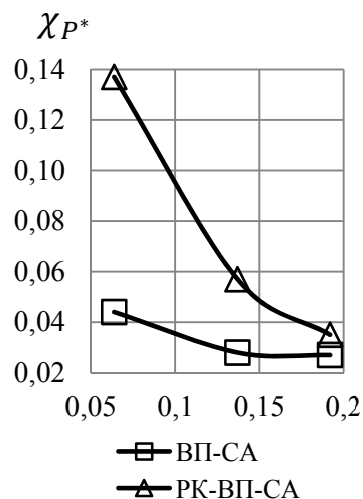


Рис. 3 – Коефіцієнт нерівномірності перед соплами

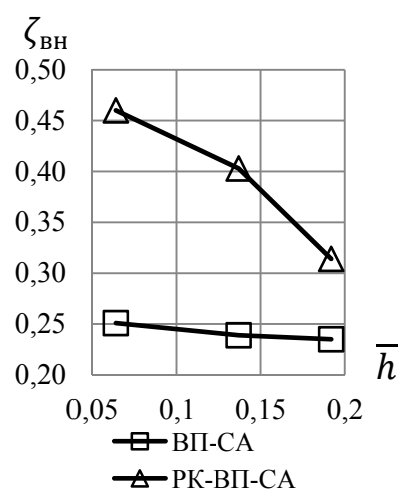


Рис. 4 – Коефіцієнт внутрішніх втрат у ВП при роботі у відсіках

Профілі запірних чаш досліджених моделей показано на рис. 5. Вони відповідають реальним конструкціям СК та РК, що експлуатуються у складі ПТ ТЕС України.

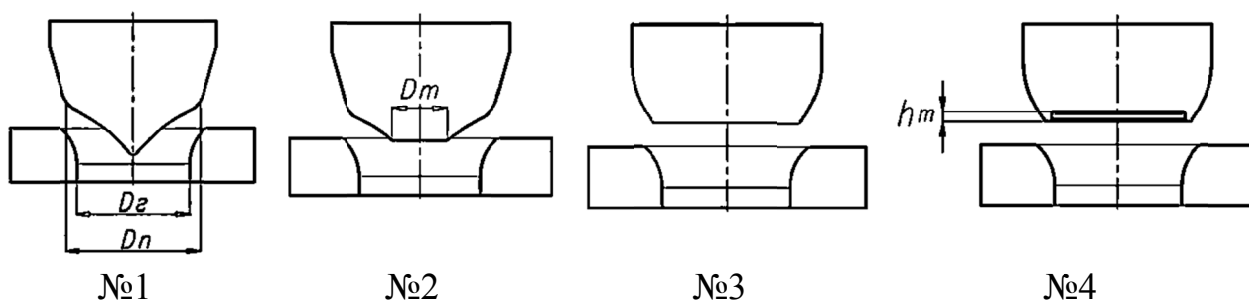


Рис. 5 – Форми профілів запірних чаш

Чисельне дослідження нестационарної течії пари проведено для двох режимів роботи клапана: режим максимального підйому (умовно), коли мінімальна площа між сідлом та запірною чашею дорівнює площі горла сідла, а відносний тиск складає 0,98 та режим часткового відкриття клапана, коли мінімальна площа між сідлом та чашею дорівнює 25 % від площі горла сідла, а відносний тиск – 0,8. Вихідні дані відповідають режимам роботи РК ПТ К-200-130 і представлені в табл. 2.

В якості основних величин для аналізу прийнято наведений коефіцієнт витрати та абсолютне значення виштовхуючого парового зусилля на робочій поверхні чаші

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^{Rk} P \cdot R \cdot dR \cdot d\varphi + \int_0^{2\pi} \int_{Rk}^0 P \cdot R \cdot dr \cdot d\varphi \quad (6)$$

де P – локальний тиск на поверхні чаші; R – радіус від осі клапанного каналу до розташування точки вимірюваного тиску; φ – кут орієнтації точки виміру тиску в окружному напрямку.

Приклад моделі досліджуваного проточного тракту показано на рис. 6.

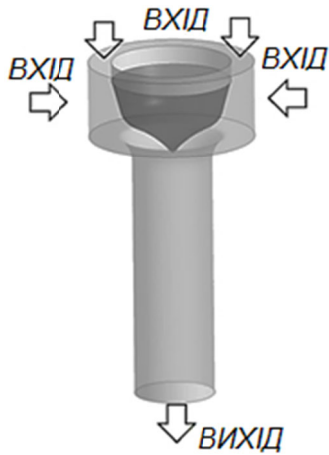


Рис. 6 – Геометрична модель проточного тракту

Таблиця 2 – Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Режим	
	Макс. відкриття	Часткове відкриття
Повний тиск на вході, МПа	12,481	12,481
Повна температура на вході, К	811,15	811,15
Степінь турбулентності на вході, %	0	0
Статичний тиск на виході, МПа	12,231	9,985
Робоче тіло	В'язка перегріта пара	

В результаті чисельного дослідження нестационарної течії пари встановлено, що при рівномірному розподілі газодинамічних параметрів на вході й режимі часткового відкриття клапана форма профільної поверхні чаші незначним чином впливає на пропускну здатність клапана (в межах 1,0 %), для всіх моделей значення пульсацій парового зусилля є незначним (в межах 8 Н з частотою порядку 200 Гц).

На режимах максимального відкриття клапана найбільшу пропускну здатність та найменше значення пульсацій парового зусилля мають профілі запірних чаш №1 та №2. Чаша з профілем №3 має на 5,0 % менший наведений коефіцієнт витрати та більший рівень пульсацій парового зусилля (156 Н з частотою порядку 18 Гц) порівняно з чашею №1. Торцева виїмка у профіля №4 дозволяє збільшити пропускну здатність клапана з профілем №3 на 3,2 % та знизити максимальне значення пульсацій до 1,1 Н.

На другому етапі проведено дослідження з врахуванням особливостей конструкції СК та РК, таких як односторонній боковий підвід пари у клапанну коробку, тракт системи розвантаження, дифузорну частину сідла. Дослідження виконано для моделей клапана з профільною поверхнею чаші №2 та №4. Приклад моделі досліджуваного проточного тракту наведено на рис. 7. Вихідні дані для розрахунку представлено в табл. 2.

В результаті чисельного дослідження нестационарної течії встановлено, що при максимальному відкритті клапана найбільш ефективним виявляється конструкція з запірною чашею №2 профільованого типу (Вентурі). Наведений коефіцієнт витрати для клапана з чашею №2 склав 0,265, для клапана з чашею №4 – 0,228. Значення пульсацій парового зусилля для клапана з чашею №2 сягає 7 Н з частотою 129 Гц (рис. 8 а), що є наслідком незначного відриву потоку на вихідній частині дифузора. Значення пульсацій парового зусилля для клапана з чашею №4 сягає 29 Н з частотою порядку 91 Гц, що є наслідком несталої асиметричного обтікання поверхні запірної чаші.

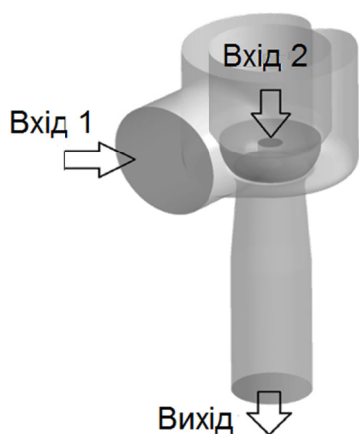
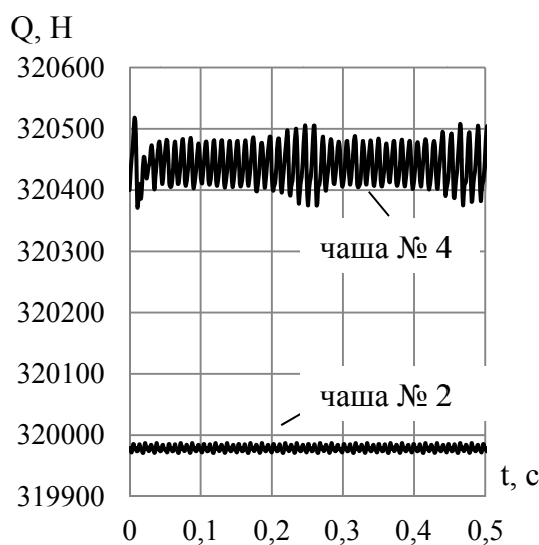


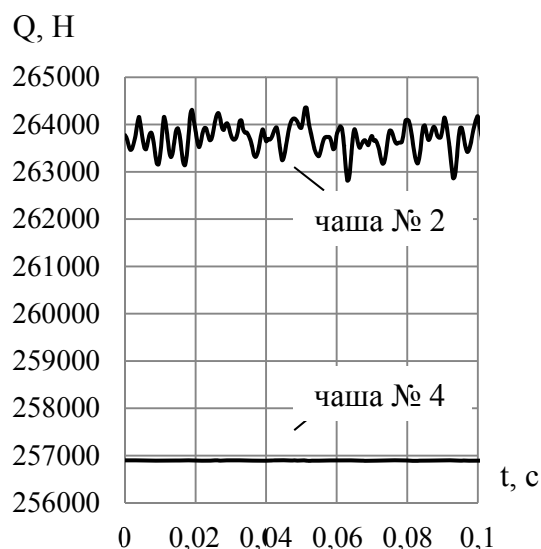
Рис. 7 – Модель
проточного тракту клапана

При частковому відкритті клапана більш ефективною є конструкція клапана з глибоким торцевим підрізанням. Наведений коефіцієнт витрати для клапана з чашею №2 склав 0,227, для клапана з чашею №4 – 0,250. Значення пульсацій парового зусилля для клапана з чашею №2 сягає 1142 Н з частотою 20 Гц (рис. 8 б), що є наслідком несталої асиметричного обтікання робочої поверхні запірної чаші та дифузornoї частини сідла. Значення пульсацій парового зусилля для клапана з чашею №4 сягає 16 Н з частотою порядку 112 Гц. Обтікання профілю цієї запірної чаші має симетричний відривний характер.

Наявність одностороннього бічного підведення пари в клапанну коробку призводить до нерівномірного розподілу параметрів парового потоку на вході в клапанний канал, утворений сідлом і запірною чашею, в результаті чого порушується осьова симетрія течії, виникає нестале обтікання запірної чаші та, як наслідок, збільшуються втрати енергії парового потоку в клапані.



а



б

Рис. 8 – Нестационарна зміна виштовхуючого парового зусилля
на робочій поверхні запірної чаші

а – режим максимального відкриття; б – режим часткового відкриття

Для визначення впливу геометричних співвідношень вхідного відсіку проточного тракту клапана з одностороннім бічним підведенням пари в клапанну коробку (рис. 9) проведено дослідження стаціонарної течії пари для 16-ти моделей клапанів на режимі максимального відкриття (див. табл. 2).

Результати розрахунку наведено на рис. 10 та рис. 11.

В результаті дослідження встановлено, що при фіксованому діаметрі горла сідла D_c збільшення діаметра підвідного патрубку D_m призводить до

збільшення пропускної здатності клапана. При цьому, значення оптимального діаметра клапанної коробки D_k зменшується при зменшенні діаметра підвідного патрубка D_{nn} . Зсув підвідного патрубка в сторону віддалення від верхньої кромки сідла призводить до зниження нерівномірного розподілу параметрів парового потоку перед зазором між запірною чашею та сідлом в певному діапазоні значень відношення діаметра клапанної коробки до діаметра горла сідла D_k/D_g .

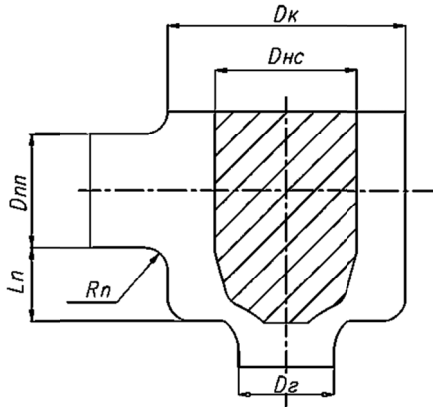


Рис. 9 – Геометричні характеристики вхідного відсіку клапана

При обмежених габаритах клапанної коробки більш ефективним засобом є збільшення площі прохідного перетину підвідного патрубка, ніж зміщення підвідного патрубка, що має меншу площу прохідного перетину, в сторону віддалення від верхньої кромки сідла.

На підставі результатів чисельного дослідження для розглянутих типорозмірів моделей клапана можна рекомендувати наступний діапазон геометричних співвідношень, що забезпечують низький рівень втрат енергії:

– без віддалення підвідного патрубка
 $(D_k/D_g)^{pek} = 2,8-3,2$ – для $D_{nn}/D_g = 1,7$;
 $(D_k/D_g)^{pek} = 2,0-2,4$ – для $D_{nn}/D_g = 1,2$;

– підвідний патрубок віддалений
 $(D_k/D_g)^{pek} = 2,4-3,0$ – для $D_{nn}/D_g = 1,7$;
 $(D_k/D_g)^{pek} = 2,2-2,0$ – для $D_{nn}/D_g = 1,2$.

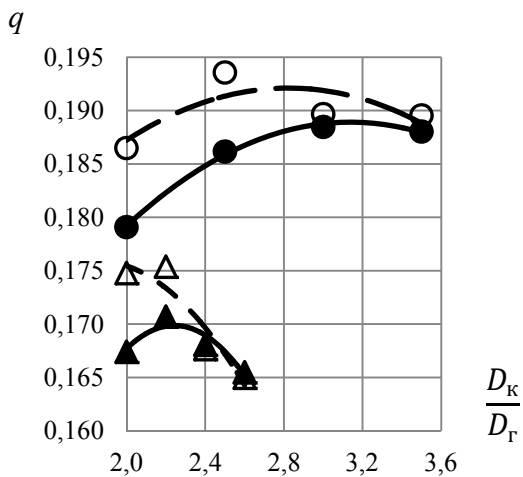


Рис. 10 – Наведений коефіцієнт витрати клапана

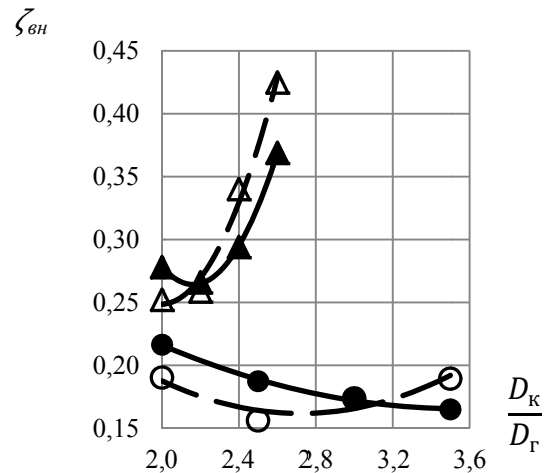


Рис. 11 – Коефіцієнт внутрішніх втрат для клапана

● $D_{nn}/D_g=1,7$ (патрубок без віддалення); ○ $D_{nn}/D_g=1,7$ (патрубок віддалено);
 ▲ $D_{nn}/D_g=1,2$ (патрубок без віддалення); △ $D_{nn}/D_g=1,2$ (патрубок віддалено).

У четвертому розділі представлено варіант малозатратної реконструкції РК ПТ К-200-12,7 ПАО «Турбоатом», а також сформульовано методичні рекомендації щодо проектування СК та РК й результати їх апробації.

Розроблена конструкція направляючого стакану з екраном, що має непроникний сектор, звернений до підвідного патрубка та силовими стійками для зменшення втрат енергії робочого тіла при його течії в проточному тракті СК та РК кутового типу з одностороннім боковим підведенням пари в клапанну коробку (рис. 12).

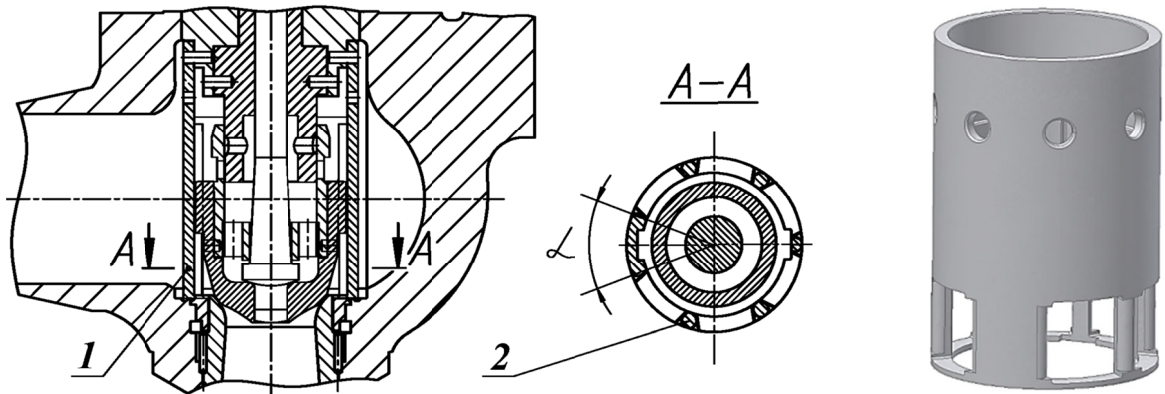


Рис. 12 – Конструкція РК з направляючим стаканом з екраном

Основною задачею непроникного сектора екрану є зменшення нерівномірного розподілу параметрів парового потоку на вході в клапанний канал за рахунок збільшення витрати пари на протилежній від підвідного патрубка стороні клапанної коробки.

Для визначення ефективності запропонованого рішення проведено чисельне дослідження течії пари в проточному тракті РК ПТ К-200-12,7 ПАО «Турбоатом» та аналогічної моделі РК, що має направляючий стакан з екраном. В процесі дослідження також визначалась оптимальна протяжність непроникного сектору екрана.

Вихідні дані для досліджуваних режимів наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Вихідні дані для розрахунку

Параметри	Режим		
	G_h	G_{max}	G_{nom}
Повний тиск на вході, МПа	12,481	12,481	12,481
Повна температура на вході, К	811,15	811,15	811,15
Степінь турбулентності на вході, %	5	5	5
Витрата пари на виході, кг/с	69,1	85,6	41,1
Відносне відкриття клапана	0,060	0,137	0,227

В результаті чисельного дослідження визначено, що застосування конструкції направляючого стакану з екраном для моделі РК ПТ К-200-12,7 ПАО «Турбоатом» приводить до підвищення газодинамічної ефективності клапана. Коефіцієнт внутрішніх втрат в клапані на режимах номінальної G_{nom} та максимальної

G_{max} витрати пари через РК з направляючим стаканом та екраном різної протяжності знижено приблизно на 50 % (рис. 13).

При аналізі результатів чисельного дослідження виявлено, що для вихідного варіанта конструкції РК на всіх досліджуваних режимах наявний

відрив потоку від стінок дифузornoї частини сідла. Для моделі РК з направляючим стаканом з екраном на всіх режимах відрив визначений тільки для моделі з екраном, протяжністю 30 градусів та режимі максимальної витрати пари G_{max} . Наявність відриву парового потоку приводить до значного зменшення ефективності клапана за рахунок збільшення рівня втрат енергії в дифузорі (рис. 14), що характеризується коефіцієнтом повних втрат енергії

$$\zeta_d = \frac{1 - \left(\frac{P_2}{P_1^*}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{1 - \left(\frac{P_1}{P_1^*}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}, \quad (7)$$

де P_1^* – повний тиск в горлі клапана; P_1 – статичний тиск в горлі клапана; P_2 – статичний тиск на виході дифузора.

Визначено, що зниження сумарного значення втрати енергії робочого тіла в клапані з направляючим стаканом з екраном є наслідком підвищення ефективної роботи дифузора, що в значній мірі компенсує втрати енергії при обтіканні непроникного сектору екрану.

Для досліджуваної моделі РК найбільш ефективним є направляючий стакан з протяжністю непроникного сектору екрану 40-50 градусів.

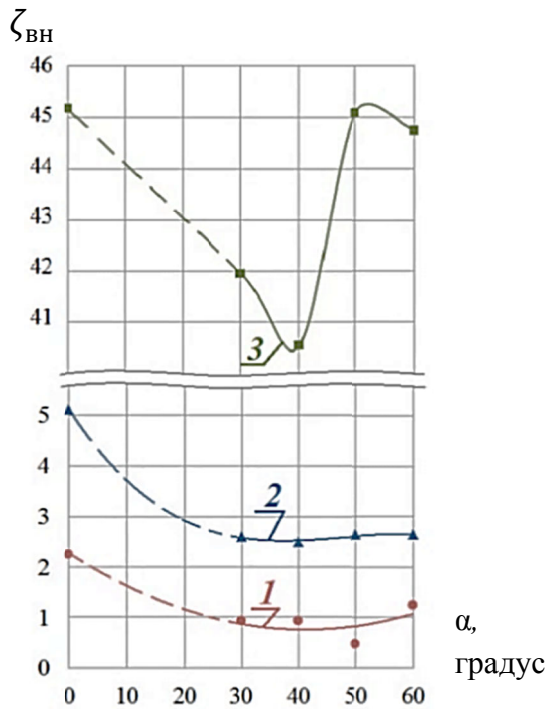


Рис. 13 – Зміна коефіцієнта внутрішніх втрат

1 – режим $G_{ном}$; 2 – режим $G_{макс}$; 3 – режим G_h .

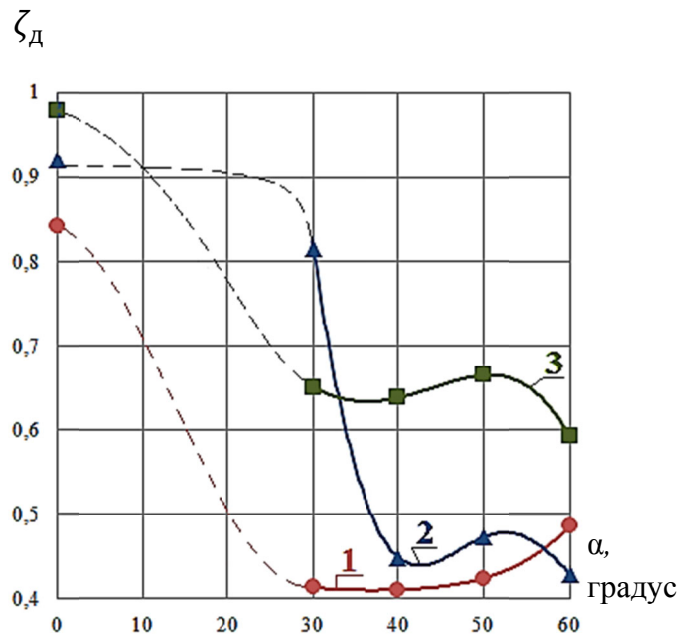


Рис. 14 – Зміна коефіцієнта повних втрат в дифузornoї частині сідла

На підставі чисельних результатів, отриманих в роботі, а також результатів, отриманих іншими авторами, були сформульовані методичні рекомендації щодо проектування проточного тракту СК та РК з низьким рівнем втрат енергії робочого тіла.

Схема основних геометричних параметрів клапана показана на рис. 15. Порядок визначення геометрії клапана та рекомендовані співвідношення геометричних параметрів наведені в табл. 4.

приблизно на 50 % в порівнянні з вихідною конструкцією на режимі максимального і часткового відкриття клапана. Додаткове вироблення потужності за рахунок вдосконалення РК № 2 турбоустановки К-200-130 на режимі максимального і часткового його відкриття може скласти 176,7 кВт і 2565,9 кВт відповідно. Додаткове вироблення потужності за рахунок вдосконалення РК-3 турбоустановки К-325-23,5 на режимі максимального і часткового відкриття клапана може скласти 224,9 кВт і 367,6 кВт відповідно.

У п'ятому розділі показано оригінальну конструкцію пристрою для очистки пари від інородних включень (рис. 16) (розробка захищена патентом).

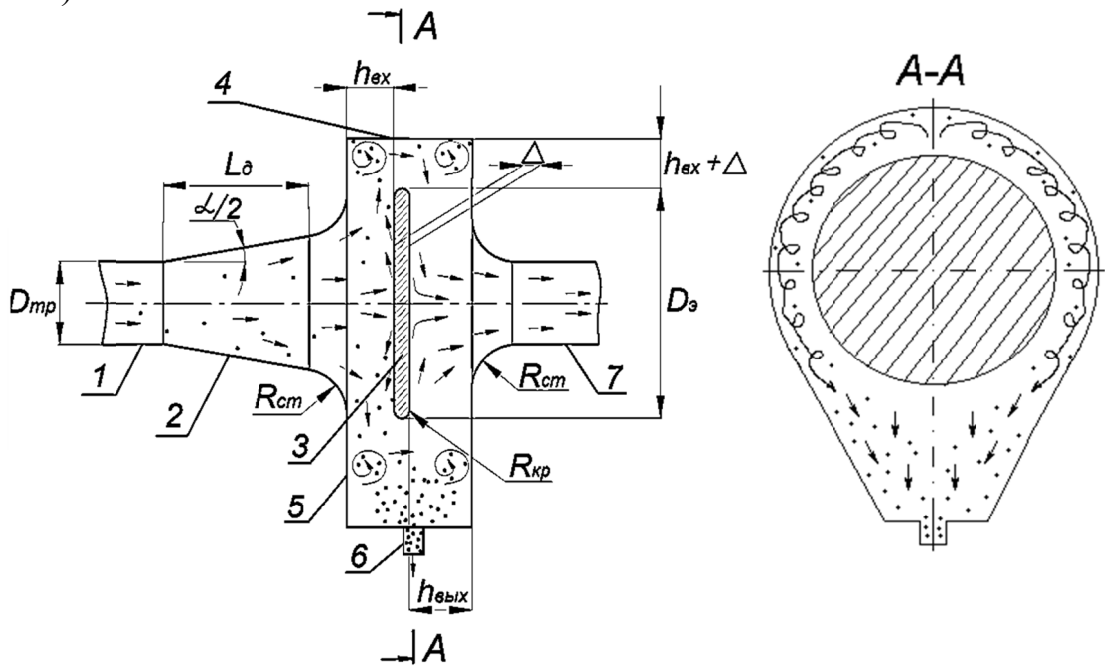


Рис. 16 – Схема пристрою для очистки пари від інородних включень

Принцип роботи запропонованого пристрою полягає у відділенні твердих частинок еродента від основного потоку пари за рахунок використання інерційних сил, що впливають на тверду частинку при її течії з зміною напрямлення руху. При проходженні пари, що містить іногородні включення, на ділянці дифузрного розширення 2 потік обтікає відображуючу поверхню екрана 3. При цьому відбувається зменшення швидкості руху іногородних включень, що містяться в потоці. В результаті обтікання екрана за рахунок сил інерції відбувається притиснення рухливих у пари твердих частинок до стінок 4 з відображенням їх у пристінні кутові зони циліндричної частини корпусу. Залучені до вихрових зон тверді частинки гальмуються, втрачають кінетичну енергію та переміщаються по боковим стінкам в приймальну камеру 5, з якої періодично при продувці виводяться з пристрою через дренажне відведення 6.

Газодинамічні дослідження конструкції пристрою, запропонованого для частини високого тиску ПТ К-200-130, показали, що проточний тракт пристрою забезпечує низький рівень втрати енергії робочого тіла. При розрахунковій швидкості парового потоку на вході 50 м/с втрати повного тиску парового потоку становлять 13,5 кПа.

ВИСНОВКИ

1) Сформовано математичну модель та обрано чисельний метод дослідження газодинамічних процесів в проточному тракті паророзподілу ПТ. Достовірність методу підтверджено зіставленням чисельних результатів з експериментальними даними для конструкцій клапанів ПТ ТЕС і АЕС.

2) Проведено чисельне дослідження газодинамічних процесів в паровпускному тракті циліндра ПТ К-200-130. Встановлено, що передуючий регулюючий клапан призводить до збільшення втрат енергії робочого тіла для вхідного патрубку на 80 %, а для соплового апарата першого ступеня циліндра турбіни – на 25 %.

3) Чисельні дослідження впливу конструкції клапана на нестационарні характеристики парового потоку та витратну спроможність клапана показали, що для конструкцій СК та РК з одностороннім бічним підведенням пари в клапанну коробку та роботі з великим відкриттям клапана найбільш ефективною є конструкція з чашею профільованого типу (Вентурі). При тривалій роботі клапана з малим відкриттям клапана більш ефективною є конструкція клапану з чашею, що має глибоке торцеве підрізання.

4) У результаті дослідження впливу геометричних характеристик вхідного відсіку проточного тракту клапана встановлено діапазон геометричних співвідношень вхідного відсіку клапана, що забезпечує низький рівень втрати енергії робочого тіла:

– без віддалення підвідного патрубка

$$(D_k/D_z)^{pek} = 2,8-3,2 \text{ – для } D_{nn}/D_z = 1,7;$$

$$(D_k/D_z)^{pek} = 2,0-2,4 \text{ – для } D_{nn}/D_z = 1,2;$$

– підвідний патрубок віддалений

$$(D_k/D_z)^{pek} = 2,4-3,0 \text{ – для } D_{nn}/D_z = 1,7;$$

$$(D_k/D_z)^{pek} = 2,2-2,0 \text{ – для } D_{nn}/D_z = 1,2.$$

5) Для підвищення газодинамічної ефективності СК та РК запропонована конструкція клапана з направляючим стаканом з екраном, що має непроникний сектор, обернений до вхідного патрубка, установка якого призводить до зниження значення втрат енергії в клапані кутового типу з одностороннім бічним підведенням пари в клапанну коробку та профілем клапанного каналу типу Вентурі на 50 %.

7) На основі проведених досліджень сформульовано рекомендації для проектування проточного тракту СК та РК, що забезпечують високі показники економічності та надійності. Результати роботи використані при розробці проектів модернізації паророзподілу ПТ К-200-130 та К-800-240 ПАТ «Турбоатом» (м. Харків, Україна, акт впровадження ТА-01-653).

8) Для зниження абразивного зносу елементів проточного тракту ПТ запропоновано підхід проектування пристрою для очищення пари від сторонніх включень (розробка захищена патентом).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бабаев А. И., Голощапов В. Н. Применение комбинированной программы регулирования для турбоустановок большой мощности с сопловым регулированием // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні процеси й устаткування. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. № 17 (1125). С. 75-80. ISSN 2078-774X.
2. Бабаев А. И., Голощапов В. Н. Верификация результатов численного исследования движения потока в проточной части регулирующего клапана паровой турбины // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. № 8(1180). С. 88-93. ISSN 0131-2928.
3. Бабаев А. И., Голощапов В. Н. Применение непроницаемых экранов для стабилизации течения в угловом регулирующем клапане // Проблемы машиностроения. 2016. Т. 19, №4. С. 19-24. ISSN 0131-2928.
4. Бабаев, А. И. Анализ современных конструкций стопорно-регулирующих клапанов // Проблемы машиностроения. 2017. Т. 20, № 1. С. 11-16. ISSN 0131-2928.
5. Бабаев А. И., Голощапов В. Н. Исследование структуры потока в тракте паровпуска турбины методом математического моделирования // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 9. С. 17–23. ISSN 2078-774X.
6. Мало затратная реконструкция регулирующего клапана турбины К-200-130 в межремонтный период эксплуатации / Бабаев И. Н., Колодяжная Л. В., Голощапов В. Н., Бабаев А. И. // Компрессорное и энергетическое машиностроение. Суми, 2017. Т. 49, № 3. С. 6-9. ISSN 2413-4562.
7. Бабаев А. И., Колодяжная Л. В., Голощапов В. Н. Численное исследование структуры потока во входном отсеке проточного тракта клапана паровой турбины // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. № 12. С. 57-61. ISSN 2078-774X.
8. Пат. на винахід 116596 Україна, МПК8 В 01 D 45/08, В 01 D 45/16 Пристрій для очищення пари від сторонніх включень / Бабаєв А. І, Голощапов В. М., Котульська О. В.; власник Інститут проблем машинобудування ім. А. Н. Підгорного НАН України. № а201612128; заявл. 30.11.16; опубл. 10.04.18, Бюл. №7. 4 с.
9. Голощапов В. Н., Бабаев А. И. Расчетное исследование влияния разгрузки регулирующего клапана на его расходную характеристику // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: материалы XV междунар. научн.-техн. Конференции – Харьков: ИПМаш, 2015. 9 с. 1 электрон. опт. диск (CD-R).
10. Бабаев А. И., Голощапов В. Н. Влияние подрезки запорной чаши на эффективную работу регулирующего клапана паровой турбины // Совершенствование турбоустановок методами математического и

физического моделирования: материалы XVI междунар. научн.-техн. Конференции – Харьков: ИПМаш, 2017. 2 с. 1 электрон. опт. диск (CD-R).

11. Бабаев А. И. Численное исследование структуры потока в паровой коробке регулирующего клапана // Тез. докл. конф. молодых ученых и специалистов, Харьков: Ин-т проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, 2015. С. 21.

12. Бабаев А. И. Применение непроницаемых экранов для стабилизации течения в регулирующем клапане с односторонним боковым подводом // Тез. докл. конф. молодых ученых и специалистов, Харьков: Ин-т проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, 2016. С. 38.

АНОТАЦІЯ

Бабаєв А. І. Вплив паророзподілу на ефективність роботи турбін великої потужності. – 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, 2018.

Робота присвячена дослідженню газодинамічних процесів в проточному тракті паророзподілу потужних парових турбін, зокрема, проточному тракті стопорних та регулюючих клапанів, а також розробці конструкції пристрою, призначеного для зниження абразивного зносу проточного тракту паротурбінної установки.

Проведено чисельне дослідження газодинамічних процесів в проточному тракті паровпуску парової турбіни, що складається з регулюючого клапана, вхідного патрубку та соплового апарата регулюючого ступеня. Досліджено вплив елементів типової конструкції стопорних та регулюючих клапанів з одностороннім бічним підведенням пари в клапанну коробку на значення втрат енергії та нестационарні характеристики парового потоку. На основі чисельних досліджень набула подальшого розвитку методика проектування СК та РК, яка враховує вплив геометричних співвідношень вхідного відсіку проточного тракту клапанів на їх показники ефективності та надійності.

Запропоновано новий пристрій для захисту проточного тракту ПТ від абразивного зносу, принцип роботи якого полягає у відділенні твердих частинок еродента від основного потоку за рахунок використання інерційних сил, що впливають на частку при її криволінійному русі.

Ключові слова: регулюючий клапан, стопорний клапан, паророзподіл, парова турбіна, паровпуск, система регулювання, абразивний знос.

АНОТАЦИЯ

Бабаев А. И. Влияние парораспределения на эффективность работы турбин большой мощности. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.16 – «Турбомашины и турбоустановки» (142 – энергетическое машиностроение) – Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, Харьков, 2018.

Работа посвящена исследованию газодинамических процессов в проточном тракте парораспределения мощных паровых турбин, в частности, проточном тракте стопорных и регулирующих клапанов, а также разработке конструкции устройства, предназначенного для снижения абразивного износа проточного тракта паротурбинной установки.

Проведено численное исследование газодинамических процессов в проточном тракте паровпуска паровой турбины, состоящего из регулирующего клапана, входного патрубка и соплового аппарата регулирующей ступени. Исследовано влияние элементов типичной конструкции стопорных и регулирующих клапанов с односторонним боковым подводом пара в клапанную коробку на потери энергии и нестационарные характеристики парового потока. На основании результатов исследований сформулировано методические рекомендации по проектированию стопорных и регулирующих клапанов паровых турбин, которые обеспечивают высокие показатели экономичности и надежности.

Предложен подход к проектированию устройства для очистки пара от инородных включений, принцип работы которого заключается в отделении твердых частиц эродента от основного потока за счет использования инерционных сил, действующих на частицу при ее криволинейном движении.

Ключевые слова: регулирующий клапан, стопорный клапан, парораспределение, паровая турбина, паровпуск, система регулирования, абразивный износ.

ABSTRACT

Babayev A. I. Influence of the steam distribution on the efficient operation of the high-power turbines. – Manuscript.

Thesis for the scientific degree of the Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) by specialty 05.05.16 – Turbomachines and turbines (142 – Power Machines Building) – A. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The work is devoted to gas-dynamic processes investigation in the flow path of high-power steam turbines, in particular, stop valves and control valves flow path, and as well to develop the design of device meant to reduce turbine flow path abrasive wear.

As the main investigation method of the gas-dynamic processes in the steam distribution flow path was used the numerical method of mathematical modeling of three-dimensional stationary and non-stationary flow of viscous superheated steam and air based on the use of Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations in combination with the semi-empirical turbulence model κ - ω SST and the numerical method based on the control volume. The credibility of the obtained results is confirmed by verification of numerical method results with the experimental data.

To determine the effect of flow pattern formed in the flow path of control valve on the efficiency of subsequent elements of steam turbine flow path, the numerical investigation of gas-dynamic processes in the inlet path of steam turbine K-200-130, consisting of control valve, inlet duct and nozzle apparatus of turbine first stage was carried out. It was determined that the total energy losses of working fluid in the joint operation of these elements exceed the losses in their isolated work. The main influence for the increase in energy losses, which for the nozzle apparatus can reach on 25 %, is the presence of uneven parameters of the input flow formed in the previous valve.

In the result of numerical investigation of non-stationary gas-dynamic processes, it is found that with the large lift of valve the design of locking plug of the profiled type (Venturi) is most effective. The design of valve with locking cup of this type has a high throughput and the lower level of fluctuations in steam flow parameters. With the small lift of plug, the valve design with a deep cut-off plug is more stable.

In the result of numerical investigation of the influence of the geometric characteristics of input compartment of the flow path of the valve, the range of geometric ratios of the valve input compartment, which provides a low level of energy loss of the working fluid, is established.

To reduce the energy loss in the flow path of stop and control valves of the corner type with one-sided lateral supply of the flow to the valve chest, the design of valve guide glass with a screen having an impenetrable sector facing to the inlet pipe has been developed. In the result of numerical investigation it is determined that its incorporation leads to an increase of the gas dynamic efficiency of the valve. The coefficient of total energy loss in the diffuser section of valve and the necessary pressure drop was reduced by 50 %.

Based on the numerical investigations were further developed method of stop valves and control valves design, which includes the effect of geometric correlations of valve input compartment of flow path for their performance and reliability.

To maintain the efficiency of steam turbine during the period of operation, the original design of device for the elements of flow path protection from abrasive wear is proposed. The development is patent protected. Work principle of the proposed device is to separate the solid particles of erodent from the steam flow by using the inertial forces acting on the particle in the flow with the changes in flow direction.

Keywords: control valve, stop valve, steam distribution, steam turbine, steam inlet, regulation system, abrasive wear.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0.9. Тир. 100 прим. Зам. № 503-18.
Підписано до друку 18.10.2018. 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