

УДК 621.165

Р. Б. ШЕРФЕДИНОВ, М. Г. ИЩЕНКО, Л. О. СЛАСТЬОН, С. В. АЛЬОХІНА**ПІДВИЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ЦНТ ПОТУЖНИХ ПАРОВИХ ТУРБІН**

Проаналізовані шляхи підвищення економічності та надійності циліндрів низького тиску (ЦНТ) парових турбін. Дані характеристики останніх ступенів ЦНТ з робочими лопатками довжиною 1100 і 1650 мм. Визначені резерви підвищення економічності і надійності ступенів ЦНТ. Зазначені особливості формоутворення останніх ступенів ЦНТ з робочими лопатками довжиною 1100 та 1650 мм і направляючими апаратами з шаблевидними сопловими лопатками. Застосування комбінованої шаблевидності призводить до зменшення масової витрати пари в периферійній області і, за рахунок цього, збільшення масової витрати пари в кореневій області. Отриманий в ступені з меридіональною шаблевидністю викладений вище ефект дозволяє значно зменшити відсмоктування вологоємного пара з периферійної зони міжвінцевого проміжку при забезпеченні ефективного якості активної протиерозійного захисту робочих лопаток останніх ступенів циліндрів низького тиску. Підвищення економічності останньої ступені тільки за рахунок застосування шаблеподібних лопаток становить 1,5–2,5 %. Для передостанньої ступені ефект від застосування шаблеподібних лопаток може скласти до 2 %.

Ключові слова: циліндр низького тиску, робоча лопатка, шаблевидність, економічність.

Р. Б. ШЕРФЕДИНОВ, М. Г. ИЩЕНКО, Л. А. СЛАСТЁН, С. В. АЛЁХИНА**ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ЦНД МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН**

Проанализированы пути повышения экономичности и надежности цилиндров низкого давления (ЦНД) паровых турбин. Даны характеристики последних ступеней ЦНД с рабочими лопатками 1100 и 1650 мм. Определены резервы повышения экономичности и надежности ступеней ЦНД. Обозначены особенности формообразования последних ступеней ЦНД с рабочими лопатками длиной 1100 и 1650 мм и направляющими аппаратами с саблевидными сопловыми лопатками. Применение комбинированной саблевидности приводит к уменьшению массового расхода пара в периферийной области и, за счет этого, увеличение массового расхода пара в корневой области. Полученный в степени с меридиональной саблевидностью изложенный выше эффект позволяет значительно уменьшить отсасывания влажного пара из периферийной зоны межвенцевого промежутке при обеспечении эффективного качества активной противорозийной защиты рабочих лопаток последних ступеней цилиндров низкого давления. Повышение экономичности последней ступени только за счет использования саблевидных лопаток составляет 1,5-2,5 %. Для предпоследней ступени эффект от использования саблевидных лопаток может составить до 2 %.

Ключевые слова: цилиндр низкого давления, рабочая лопатка, саблевидность, экономичность.

R. SHERFEDINOV, M. ISHCENKO, L. SLASTON, S. ALYOKHINA**ENHANCEMENT OF COST-EFFECTIVENESS AND RELIABILITY OF LPCS OF POWERFUL STEAM TURBINES**

The ways of increasing the cost-effectiveness and reliability of low pressure cylinders (LPC) of steam turbines are analyzed. The characteristics of the last stages of the low pressure cylinder with rotor blades 1100 and 1650 mm are given. The reserves of increasing the efficiency and reliability of the low-pressure cylinder stages are determined. Designation features of the last stages of the low pressure cylinder with working blades 1100 and 1650 mm long and guiding devices with saber-shaped nozzle blades are indicated. The use of combined scribbling leads to a decrease in the mass flow of steam in the peripheral region and, due to this, an increase in the mass flow of steam in the root region. Obtained in the degree of meridional saber-like effect described above allows to significantly reduce the suction of moisture-absorbing steam from the peripheral zone of the inter-gap gap while ensuring the effective quality of active anti-erosion protection of the working blades of the last stages of low pressure cylinders. Increasing the cost-effectiveness of the last stage only through the use of saber-shaped blades is 1.5-2.5 %. For the penultimate stage, the effect of the use of saber-shaped blades can be up to 2 %.

Keywords: low pressure cylinder, rotor blade, saber-shaped, cost-effectiveness.

Вступ. Сучасні задачі створення та модернізації енергетичного обладнання пред'являють високі вимоги до вдосконалення показників економічності та надійності потужних енергетичних парових турбін. Зазначені показники в значній мірі визначаються рівнем газодинамічної досконалості циліндра низького тиску включаючи вхідний патрубок з ресиверами, проточну частину ступенів і вихлопного тракту до конденсатора. В циліндрах низького тиску (ЦНТ), в свою чергу, одне з центральних місць займає вихлопний відсік, що включає останню ступень з попередньо включеном міжступеневим проміжком і вихлопним трактом у складі вихлопного і перехідного патрубків, так як в потужних парових турбінах теплових електростанцій (ТЕС) і особливо атомних електростанцій (АЕС) останні ступені виробляють більшу потужність, а втрати з вихідною швидкістю складають значну величину від наявного перепаду тепла. Тому вдосконалення газодинамічних і енергетичних характеристик вихлопного відсіку може забезпечити надійність і помітне підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) турбоагрегату.

Оскільки вихлопний відсік складається з останнього ступеня і вихлопного тракту, то, звичайно, його ефективність визначається як ступенем так і трактом в умовах взаємовпливу. Останнє проявляється у впливі нерівномірності гідравлічного опору вихлопного тракту в окружному і радіальному напрямках, турбулентності за ступенем, витоку пари через канали видалення вологи і надбандажний проміжок та ін. В той же час надійність вихлопного відсіку в основному визначається надійністю робочого колеса ступеня за параметрами міцності і ерозійної стійкості.

Досвід експлуатації потужних парових турбін АТ «Турбоатом» свідчить про високу надійність останніх ступенів і всього облопачування ЦНТ з різною частотою обертання. В той же час досягнуті в минулі роки успіхи в розробці та апробації нових технічних рішень, спрямованих на отримання більш високих експлуатаційних і техніко-економічних показників турбін, показують, що наявні проточні частини розполагають резервами по економічності. Реалізація

© Р. Б. Шерфедінов, М. Г. Іщенко, Л. О. Сластьон, С. В. Альохіна, 2019

цих резервів, навіть дискретно, дозволяє досягати сучасного технічно можливого рівня. Тому створення нових циліндрів низького тиску та модернізація існуючих виконується комплексом розрахунково-конструкторських розробок на базі найбільш ефективних та апробованих рішень в турбінобудуванні з використанням чисельного 3D-експерименту, що дозволяє приймати більш ефективні та надійні рішення.

Характеристика останніх ступенів ЦНТ з робочими лопатками довжиною 1100 і 1650 мм. Останні ступені з робочими лопатками довжиною 1100 мм і 1650 мм працюють на вологій парі, що надходить із передостаннього ступеня через канал міжступеневого проміжку з відбором пари. Меридіональний обвід цього каналу утворений у відсіку з лопаткою 1100 мм – спеціальним профільованим кільцем, що є елементом обода діафрагми передостаннього ступеня, в відсіку з лопаткою 1650мм – спеціальним профільованим кільцем, прикріпленим до обода діафрагми передостанньої ступені через дистанційні втулки для утворення кільцевої щілини відсмоктування вологоємного пара. Між зазначеними кільцями і обіддям діафрагм останніх ступенів утворені кільцеві щілини відбору пари в систему регенерації.

Розглянуті останні ступені мають розвинену систему вологовидалення, що включає сепарацію всередині каналу і відсмоктування вологоємного пара з периферійної зони міжвінцевого проміжку. Всередині каналу сепарація здійснюється відсмоктуванням плівкової вологи через одну щілину на спинці соплової лопатки.

В ступенях з лопатками довжиною 1100 мм і 1650мм відсмоктування плівкової вологи і вологоємної пари з міжвінцевого проміжку здійснюється через дві кільцеві щілини (за вихідними кромками соплових лопаток і перед вхідними кромками робочих лопаток), утворені спеціальним кільцем між ободом діафрагми і надбандажним кільцем ущільнювача, а також через надбандажний канал. Зазначене кільце утворює меридіональний периферійний обвід міжвінцевого проміжку ступеня.

Основні геометричні параметри останніх ступенів ЦНТ виробництва АТ «Турбоатом» приведені в [1, 2] з робочою лопаткою 1100 мм – в [3], з 1650 мм – в [4].

Додатково наведемо деякі геометричні параметри, що характеризують особливості формоутворення проточної частини вище зазначених останніх ступенів з урахуванням передостанніх ступенів, так як передостанній ступінь і міжступеневий канал формують параметри потоку перед останнім ступенем.

Повна геометрична периферійна перекириша По, яка дорівнює різниці периферійних радіусів робочих решіток останньої і передостанньої ступенів, становить в ступені з лопаткою 1100мм – 48,3 %, осьова відстань між вихідною кромкою робочих

лопаток передостаннього ступеня і вхідними кромками робочих лопаток останнього ступеня в периферійних перерізах $Loz = 55,6 \%$. В результаті кут меридіонального розкриття умовного обводу ступені становить $\alpha_0 = 41$ град. Перекириші міжступеневі і міжвінцеві становлять: $P_{мс} = 18,1 \%$ і $P_{мв} = 4,2 \%$, відповідно. При цьому частка міжвінцевої перекириші $P_{мв} / Po$ становить 8,7 %. Геометричний кут меридіонального периферійного розкриття в міжвінцевому проміжку $\alpha_{мв} = \arctg (P_{мв} / L_{мвz}) = 22,1$ град.

У ступені з лопаткою 1650мм По становить 42,7 %, $Loz = 46,9 \%$, $\alpha_0 = 42,4$ град., $P_{мс} = 18,5 \%$, $P_{мв} = 6,6 \%$, $P_{мв} / Po = 15,5 \%$. $\alpha_{мв} = \arctg (P_{мв} / L_{мвz}) = 40,8$ град.

Резерви підвищення економічності і надійності ступенів ЦНТ потужних парових турбін. На загальну думку, в ЦНТ зосереджені не тільки найскладніші проблеми аеродинаміки турбіни, а й містяться найбільші резерви підвищення економічності. В першу чергу це відноситься до останніх ступенів з вихлопними трактами, але це стосується також передостанніх ступенів та інших.

Економічність ступеня значною мірою залежить від умов входу в ступінь і робоче колесо. Одними з таких параметрів, які формують ці умови, є міжступеневі і міжвінцеві перекириші, осьові міжступеневі і міжвінцеві проміжки на периферії. Якщо значення перекириш віднести до довжини робочих лопаток, то загальна, міжступенева і міжвінцева складають в ступені з лопаткою 1100 мм: 48,3; 18,1; 4,2 %; в ступені з лопаткою 1650мм: 42,7; 18,5; 6,6 %. Ці значення не враховують відбір пари з міжступеневого проміжку і витoku пари з міжвінцевого проміжку, але якісно дозволяють відзначити, що ці показники в ступенях з лопатками 1100 мм і 1650 мм гірші, ніж в інших останніх ступенях вже існуючих турбін.

В якості додаткової інформації для подальшого аналізу наведені також значення умовних кутів периферійного розкриття в міжвінцевих проміжках передостанніх ступенів в проточних частинах з робочими лопатками 1100 мм і 1650 мм: 40,2 і 40 град. відповідно.

Відносно вказаних кутів в міжвінцевих проміжках потрібно підкреслити, що фактична їх величина при обліку витоків пари з міжвінцевого проміжку, які створюють газодинамічну перекиришу, буде значно більше.

Значення наведених параметрів однозначно показують, що в периферійній зоні міжвінцевих проміжків останніх і передостанніх ступенів має місце вихрова течія з підвищеними втратами, що знижують ККД ступені [5], а також додатково генеруючими великодисперсну вологу, що підвищує ерозійні навантаження на робочі лопатки. Ефект підвищення ерозійного навантаження підтверджений досвідом експлуатації ступенів з робочими лопатками 1030мм, що мають в міжвінцевому проміжку відносну

міжвінцеву перекришу рівну 7,2% і кут меридіонального розкриття 54 град. Таким чином, міжвінцева перекриша, як параметр, однозначно не може визначати якість проточної частини ступеня. А також впливає висновок про те, що формування ступенів за критерієм виведення лінії периферійного обводу соплового апарату в вихідну кромку під бандажем робочої лопатки не забезпечує очікуваний ефективний результат. Можливо деякі параметри при розробці ступенів ЦНТ формувалися з використанням принципового положення, наведеного в [6]: «Збільшена перекриша між направляючою і робочою лопатками у периферійному обводі, оптимальне значення якої за експериментальними дослідженнями ХПП – АТ «Турбоатом» досягало для випробуваних ступенів 0,15-0,18 довжини робочої лопатки».

Існуюча в енергетичному турбобудуванні тенденція до збільшення розмірів останніх ступенів призводить до зростання периферійної окружної швидкості робочих лопаток, яка в даний час досягає 650 м / с і більше. У розглянутих в даній роботі ступенях робочі лопатки довжиною 1100 мм і 1650 мм мають периферійні окружні швидкості рівні 644 і 487 м/с. Зі збільшенням окружних швидкостей зростають втрати від вологості і посилюється ерозійний вплив вологи на робочі лопатки. Тому дуже важливе значення має ефективна організація течії вологої пари в проточній частині та вологовидалення. Зменшення кількості ерозійно небезпечної вологи, що досягає робочих лопаток розглянутих останніх ступенів, досягається організацією відбору пари перед ступенем з міжступінчатим проміжком, відсмоктування плівковою вологою зі спинки соплових лопаток в системі середньоканальної сепарації і відбору вологоємної пари з периферійної зони міжвінцевого проміжку через канали вологовидалення.

Система середньоканальної сепарації з одною щілиною на спинці направляючих лопаток (НЛ) була розроблена і експериментально досліджена в шістдесяті роки. Накопичені до теперішнього часу дані показують, що найбільш ефективним є виконання по обводу профілю в периферійній зоні щілини на зовнішній (ближче до входу) і на внутрішній стороні профілю (ближче до горла каналу), де тиск приблизно однаковий [7].

Відбір вологоємного пара з міжвінцевого проміжку зменшує витрату пари через робочу решітку, зменшує тиск в міжвінцевому проміжку, зменшує реактивність, збільшує газодинамічну перекришу, що значно змінює структуру течії і збільшує втрати, тобто, чим більше додаткові втрати будуть перевищувати зниження втрат від впливу вологи, тим більше енергії буде витрачено на підвищення ерозійної стійкості робочих лопаток.

Одним з параметрів, що впливають на ерозійну стійкість робочих лопаток, є осьова довжина міжвінцевого проміжку. Збільшення міжвінцевого проміжку знижує вплив змінних аеродинамічних сил і інтенсивність ерозійного впливу на робочі лопатки за

рахунок розгону і дроблення великодисперсної вологи, але може збільшувати втрати енергії. Якщо, наприклад, скористатися залежністю для оцінки критеріального коефіцієнта ерозійної стійкості фірми «Крафт верк Уніон» (КВУ), що має вигляд: $E = (y_{02} / P_0) \cdot U_{п3} \cdot K_r$, де експериментальний коефіцієнт K_r , що є функцією довжини міжвінцевого проміжку і товщини вихідної кромки соплової лопатки, при збільшенні проміжку в 2,3 рази, збільшується в 2,3 рази [8]. За результатами численних досліджень ППМаш, проведеним за даними чисельного експерименту вихлопного відсіку [1], збільшення проміжку в 2 рази збільшило відносну ерозійну стійкість Est в 2,6 рази [9].

Таким чином, оптимізація системи внутриканальної сепарації або заміна її на систему обігріву направляючих лопаток за умови її економічної доцільності, вибір ефективної величини відбору вологоємного пара з периферійної зони міжвінцевого проміжку і осьової довжини цього проміжку є важливим завданням при створенні останніх ступенів ЦНТ.

Соплові лопатки зазвичай виконуються прямими, встановленими практично радіально, що спрощує технологію виготовлення. Однак ступені з такими направляючими апаратами мають підвищені значення кінцевих і вихідних втрат, обмежують величину кореневої реактивності.

Одним з ефективних методів поліпшення аеродинамічних характеристик ступенів в останні роки є застосування шаблеподібних соплових лопаток в направляючих апаратах. В результаті просторового профілювання направляючого апарату кореневі перерізи соплових шаблеподібних лопаток нахилиють в окружному (тангенціальному) напрямку в бік обертання робочого колеса, а периферійні назустріч потоку в меридіональній площині.

Вперше тангенціальна шаблевидність запропонована в 1962 році в СРСР [10], а перші потужні парові турбіни з шаблевидним направляючим апаратом випущені фірмою «Siemens» в середині 1980-х років. Зараз багато провідних виробників турбін (Siemens, Alstom, Skoda, Ansaldo, Mitsubishi, «Силові Машини» і ін.) Застосовують направляючі апарати останнього ступеня ЦНТ зі складною комбінованою меридіональною і тангенціальною шаблевидністю [11, 12].

В останніх ступенях з модифікованим сопловим апаратом знижуються кореневі і периферійні кінцеві втрати. Виграш виникає від того, що зменшується частка пара, що протікає через кореневу і периферійну зону ступені. При цьому помітно підвищується коренева реактивність, що розширює область стабільної роботи ступені при часткових режимах, знижується градієнт ступеня реактивності по висоті направляючого апарату, знижується рівень втрат кінетичної енергії, а також зменшуються вихідні втрати. До цього можна додати, що локальне зниження наведеного масової витрати в периферійній області призводить до зменшення кількості ерозійно

небезпечної вологи, а збільшення проміжку між робочим колесом і направляючим апаратом сприяє більшому розгону крапель вологи, що утворюється. Збільшення швидкості крапель вологи наближає їх траєкторію руху до напрямку руху пара, зменшуючи тим самим силу удару крапель про вхідну кромку. Це додатково дозволяє значно підвищити ефективність протиерозійного захисту робочих лопаток при значному зменшенні витрати пари в систему вологовидалення [12, 13, 14].

Потік пари в останньому ступені в ЦНТ має просторовий характер. Тому для отримання достовірного результату треба використовувати чисельні 3D експериментальні дослідження. Як експериментальні, так і чисельні дослідження показали, що вони визначають кінцеві результати, і особливо при широкому діапазоні зміни режимів, необхідно проводити на рівні чисельного експерименту не для ізольованих ступенів, а для вихлопного відсіку, тобто спільно з вихлопних трактом в умовах взаємовпливу. З цього випливає, що реальну ефективність оптимізації останнього ступеня коректно можна оцінити тільки з урахуванням впливу вихлопного тракту.

Зміну останнього ступеня із застосуванням направляючих апаратів з комбінованою шаблевидністю доцільно застосувати для передостаннього ступеня, а також для інших ступенів ЦНТ.

За різними оцінками підвищення економічності останнього ступеня тільки за рахунок застосування шаблеподібних лопаток становить 1,5–2,5 %. Цей ефект значно збільшується за рахунок зменшення в 4–6 разів витрати пари в систему вологовидалення. Для передостаннього ступеня ефект від застосування шаблеподібних лопаток може скласти до 2 %.

Особливості формоутворення останніх ступенів ЦНТ з робочими лопатками довжиною 1100 та 1650 мм і направляючими апаратами з шаблевидними сопловими лопатками. Створення останнього ступеня з використанням шаблеподібних соплових лопаток в є багатопараметричною задачею. Відповідно, слід дотримуватися варіантних розрахунково-конструкторських розробок з урахуванням технологічних обмежень і проведення чисельних 3D експериментів. Тому в обсязі даної роботи виконана тільки концептуальна розрахунково-конструктивна оцінка, що показує практичну можливість і особливості формоутворення останнього ступеня ЦНТ з робочими лопатками довжиною 1100 мм і 1650 мм при застосуванні шаблевидних соплових лопаток.

Меридіональна периферійна шаблевидність. Формування меридіональної шаблевидності в ступені виконано шляхом коригування вихідної кромки соплової лопатки тільки в периферійній зоні в результаті завдання існуючої довжини соплової лопатки і стартового значення кута шаблевидності. Відсмоктування плівкової вологи і вологоємного пара

з міжвінцевого проміжку здійснюється через дві кільцеві щілини (за вихідними кромками соплових лопаток і перед вхідними кромками робочих лопаток), утворені спеціальним кільцем між ободом діафрагми і надбандажним кільцем ущільнювача, а також через надбандажний канал. Зазначене кільце утворює меридіональний периферійний обвід міжвінцевого проміжку ступеня.

Формування меридіональної шаблевидності в ступені з робочою лопаткою 1100 мм приведено на рис. 1а., в ступені з робочою лопаткою 1650 мм приведено на рис. 1б.

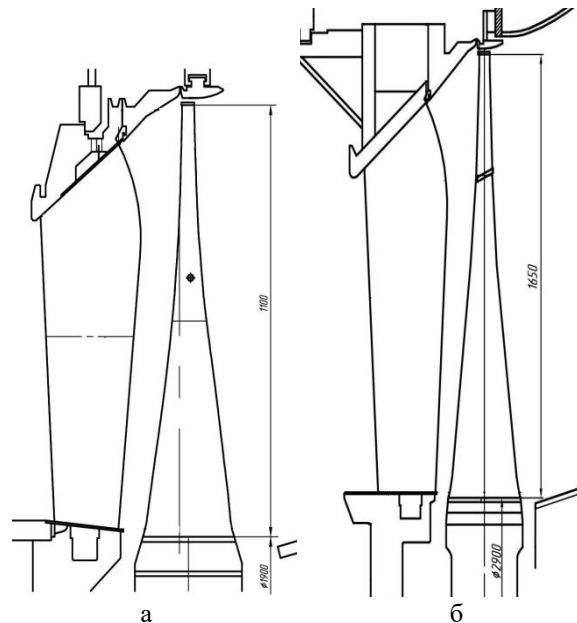


Рис. 1 – Формування меридіональної шаблевидності: а – ступінь с робочою лопаткою 1100 мм; б – ступінь з робочою лопаткою 1650 мм

Коренева окружна шаблевидність. Формування направляючого апарату з кореневої окружною шаблевидністю і меридіональною шаблевидністю вимагає проведення оптимізації соплових каналів з урахуванням формування нових ліній течії парового потоку. На рис. 2 наведено варіанти направляючих апаратів ступенів з зменшеною кількістю соплових лопаток. Особливістю виконаної окружної шаблевидності є утворення в периферійній області невеликої шаблевидності проти потоку.

Висновки. У ЦНТ зосереджені не тільки найскладніші проблеми аеродинаміки турбіни, а й містяться найбільші резерви підвищення економічності. В першу чергу, це відноситься до останніх ступенів з вихлопними трактами, а також передостанніми ступеннями.

Одним з ефективних методів поліпшення аеродинамічних характеристик ступенів в останні роки є застосування шаблеподібних соплових лопаток в направляючих апаратах.

Застосування комбінованої шаблевидності призводить до зменшення масової витрати пари в периферійній області і, за рахунок цього, збільшення

масової витрати пари в кореневій області. Витрата пари в середньому перерізі залишається на колишньому рівні. В результаті знижується градієнт ступеня реактивності по висоті направляючого апарату, збільшується степінь реактивності в кореневій зоні направляючого апарату, що розширює область стабільної роботи ступеня при часткових навантаженнях.

Меридіональна шаблевидність в ступенях з великим кутом меридіонального розкриття проточної частини на периферії забезпечує локальне піджимання потоку пари до периферійного обводу проточної частини, зниження інтенсивності вторинних течій в периферійній області і зменшення втрати кінетичної енергії.

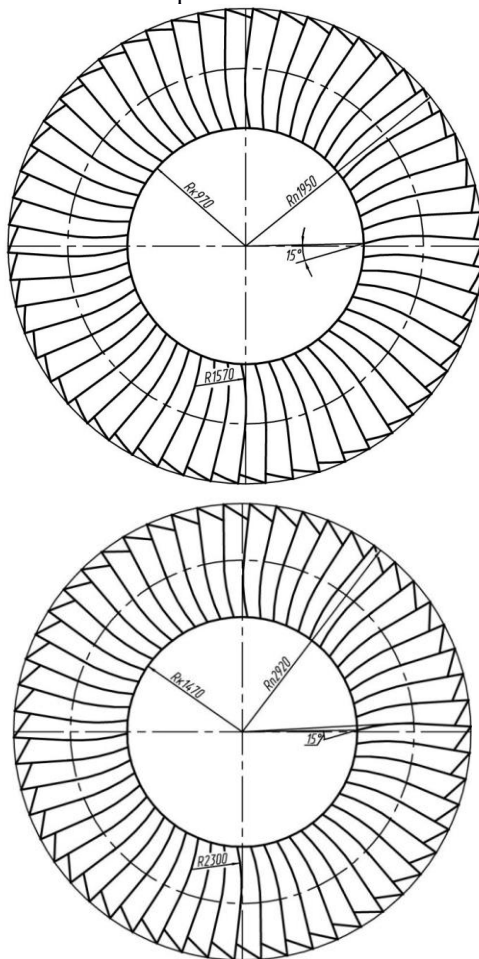


Рис. 2 – Направляючі апарати ступенів з шаблевидністю

У ступені з меридіональною шаблевидністю соплових лопаток в результаті зниження масової витрати пари в периферійній області зменшується кількість великодисперсної ерозійно небезпечної вологи, що потрапляє в незалежно сформований збільшений міжвінцевий проміжок між вихідними кромками соплових лопаток і вхідними кромками робочих лопаток. Збільшення міжвінцевого проміжку сприяє більшому розгону і зменшенню дисперсності крапель вологи, що утворюється. Збільшення швидкості крапель вологи наближає їх траєкторію руху до напрямку руху пари, зменшуючи тим самим силу удару крапель об вхідні кромки робочих лопаток,

знижуючи їх ерозійні навантаження і потужність гальмування робочого колеса.

Отриманий в ступені з меридіональною шаблевидністю викладений вище ефект дозволяє значно зменшити відсмоктування вологоємного пара з периферійної зони міжвінцевого проміжку при забезпеченні ефективного якості активної протиерозійного захисту робочих лопаток останніх ступенів циліндрів низького тиску.

Розробка нових і модернізованих ступенів ЦНТ із застосуванням направляючих апаратів з комбінованою шаблевидністю лопаток повинна виконуватися в єднанні розрахунково-конструкторських робіт з проведенням чисельних 3D експериментів для досягнення найбільш ефективних результатів з формування проточної частини ступенів в складі відсіків і всього ЦНТ.

У останньому ступені з шаблевидними сопловими лопатками змінюються значення і розподіл параметрів за робочим колесом, а також вихідна втрата. При цьому відповідно змінюються газодинамічні і енергетичні характеристики вихлопного тракту. Тому розрахунки, виконані без урахування впливу вихлопного тракту, не дозволяють коректно оптимізувати останню ступінь. Таким чином, реальні характеристики ступені і вихлопного тракту необхідно визначати в процесі проведення чисельних 3D експериментальних досліджень останньої ступені спільно з вихлопним трактом.

Підвищення економічності останньої ступені тільки за рахунок застосування шаблеподібних лопаток становить 1,5–2,5 %. Для передостанньої ступені ефект від застосування шаблеподібних лопаток може скласти до 2 %.

Список літератури

1. Солодов В. Г. Розрахункові дослідження з визначення й удосконалення газодинамічних і енергетичних характеристик вихлопного відсіку ЦНТ з робочою лопаткою останніх ступенів довжиною 1100 мм. Звіт (промеж.1). х / д. № 33-06-12. ХНАДУ. 2012. – С. 108.
2. Конев В. А. Останні рівні ЦНД з робочою лопаткою 1030 мм. Деякі питання ерозійної надійності і економічності. Звіт. Д-6736. ВАТ «Турбоатом». 2009. С. 33.
3. Солодов В. Г. Дослідження особливо формоутворення Вихлопна відсіків перспективних ЦНТ турбін на 3000 об / хв з підвальною Розташування конденсатора та їх Вдосконалення. Звіт. х / д. № 33-06-13. ХНАДУ. 2013. С. 76.
4. Солодов В. Г. Дослідження і удосконалення газодинамічних і енергетичних характеристик проточної частини ЦНТ з Робочий лопаткою довжина 1650 мм. Звіт. х / д. № 33-06-15. ХНАДУ. 2015. – С. 86.
5. Марченко Ю. О. Розробка пропозицій щодо оптимізації проточної частини ЦНД з лопаткою 936мм. Звіт. х / д. № 476-92. НВО ЦКТИ.1992. С.17.
6. Левченко Є.В., Сухинин В.П., Аркадьев Б.А., Москвіна Л.Д., Свеченовський Ю.К. Розробка останніх ступенів парових турбін НВО «Турбоатом» // Теплоенергетика. 1994. №4. С. 7-11.
7. Трояновський Б.М. Удосконалення проточних частин парових турбін // Теплоенергетика.1996. №1. С.10-17.
8. Трояновський Б.М. Турбіни для атомних станцій. Изд.2. – Москва. Вища школа. 1986.
9. Ковальський А.Д., Швецов В.Л., Конев В.А. Чисельні дослідження ерозійної стійкості робочих лопаток останніх ступенів потужних парових турбін при зміні їх параметрів // Проблеми машиностроєння.-2010.-том 13, №4.-С.3–9.

10. Дейч М.С., Губарев А.В., Філіппов Г.А., Ван Чжун-Ци. Новый метод профилирования направляющих решеток ступеней с малыми d/l // Теплоэнергетика. 1962. № 8. – С. 42–47.
11. Трояновский Б.М. Шляхи підвищення економічності парових турбін. Ч.1 // Теплоенергетика.1993. №5. – С.39-46.
12. Тохтяев А.М., Ласкін А.С., Захаров А.В. Втраги кінетичної енергії потоку по висоті направляючого апарату останнього ступеня потужних парових турбін // Наука і освіта. №06. Червень 2014. – С. 66–81.
13. Русанов А.В., Пашенко Н.В. Вплив просторового профілювання напрямних лопаток останнього ступеня парової турбіни на аеродинамічні характеристики проточної частини // Проблеми машиностроення.-2010.-том 13, №4. – С. 21–25.
14. Борисов Ф.П., Веревський В.І., Іванов М.Я., Трояновський Б.М., Карелін А.М., Цястон А.П. Просторове профілювання соплової решітки останнього ступеня потужної парової турбіни // Теплоенергетика. 1991. №8. – С. 51–54.
5. Marchenko Yu. O. Rozrobka propozicij shodo optimizaciji protochnoyi chastini CND z lopatkoju 936mm. Zvit. h / d. No 476-92. NVO CKTI.1992. P.17.
6. Levchenko Ye.V., Suhinin V.P., Arkadyev B.A., Moskvina L.D., Svechenovskij Yu.K. Rozrobka ostannih stupeniv parovih turbin NVO «Turboatom» // Teploenergetika. 1994. No4. P. 7-11.
7. Trojanovskij B.M. Udoskonalennya protochnih chastin parovih turbin // Teploenergetika.1996. No1. P.10-17.
8. Troyanovskij B.M. Turbini dlya atomnih stancij. Izd.2. Moskva. Visha shkola. 1986.
9. Kovalskij A.D., Shvecov V.L., Konyev V.A. Chiselni doslidzhennya eroziynoyi stijkosti robochih lopatok ostannih stupeniv potuzhnih parovih turbin pri zmini yih parametriv // Problemi mashinostroeniya.-2010.-tom 13, No4.-P.3–9.
10. Dejch M.Ye., Gubaryev A.V., Filippov G.A., Van Chzhun-Ci. Novij metod profilyuvannya napryamnih reshitok stupeniv z malimi d/l // Теплоенергетика. 1962. No 8. P. 42–47.
11. Troyanovskij B.M. Shlyahi pidvishennya ekonomichnosti parovih turbin. Ch.1 // Teploenergetika.1993. No5. S.39-46.
12. Tyuhtyaev A.M., Laskin A.S., Zaharov A.V. Vtrati kinetichnoyi energii potoku po visoti napravlyayuchogo aparatu ostannogo stupenya potuzhnih parovih turbin // Nauka i osvita. No06. Cherven 2014. P. 66–81.
13. Rusanov A.V., Pashenko N.V. Vpliv prostorovogo profilyuvannya napryamnih lopatok ostannogo stupenya parovoyi turbini na aerodinamichni harakteristiki protochnoyi chastini // Problemi mashinostroeniya. - 2010.-tom 13, No4.-P.21–25.
14. Borisov F.P., Verevskij V.I., Ivanov M.Ya., Troyanovskij B.M., Karelin A.M., Cyaston A.P. Prostorove profilyuvannya soplovoyi reshitki ostannogo stupenya potuzhnoyi parovoyi turbini // Teploenergetika. 1991. No8. P. 51–54.

References (transliterated)

1. Solodov V. G. Rozrahunkovi doslidzhennya z viznachennya j udoskonalennya gazodinamichnih i energetichnih harakteristik vihlopnogo vidsiku CNT z robochoju lopatkoju ostannih stupeniv dovzhinoju 1100 mm. Zvit (promezh.1). h / d. No 33-06-12. HNADU. 2012. P. 108.
2. Konyev V. A. Ostanni rivni CND z robochoju lopatkoju 1030mm. Deyaki pitannya eroziynoyi nadijnosti i ekonomichnosti. Zvit. D-6736. VAT «Turboatom». 2009. P. 33.
3. Solodov V. G. Doslidzhennya osoblivo formoutvorennya vihlopna vidsikiv perspektivnih CNT turbin na 3000 ob / hv z pidvalnim Roztashuvannya kondensatora ta yih Vdoskonalennya. Zvit. h / d. No 33-06-13. HNADU. 2013. P. 76.
4. Solodov V. G. Doslidzhennya i udoskonalennya gazodinamichnih i energetichnih harakteristik protochnoyi chastini CNT z RObochij lopatkoju dovzhina 1650mm. Zvit. h / d. No 33-06-15. HNADU. 2015. P. 86.

Надійшла (received) 09.12.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шерфедінов Різа Бахтіярович (Шерфединов Риза Бахтиярович, Sherfedinov Riza) – заступник начальника конструкторського відділу АТ «Турбоатом», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5947-7802>

Ищенко Михайло Григорович (Ищенко Михаил Григорьевич, Ishchenko Mykhailo) – начальник технологічного відділу АТ «Турбоатом», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2251-5104>

Сластьон Любов Олександрівна (Сластён Любовь Александровна, Slaston Liubov) – начальниця лабораторії жароміцних матеріалів центральної заводської лабораторії АТ «Турбоатом», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9268-8134>

Альохіна Світлана Вікторівна (Алёхина Светлана Викторовна, Alyokhina Svitlana) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, Харків, Україна; alyokhina@ipmach.kharkov.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2967-0150>