

АЕРОДИНАМІЧНЕ ВДОСКОНАЛЕННЯ СТУПЕНІ ЦИЛІНДРУ ВИСОКОГО ТИСКУ ПАРОВОЇ ТУРБІНИ ПОТУЖНІСТЮ 300 МВт ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОСТОРОВОГО ПРОФІЛЮВАННЯ ЛОПАТОК

Представлено результати числового дослідження та отримані на його основі закономірності впливу колового та осевого навалів (шаблеподібності та стрілоподібності) робочих і напрямних лопаток ступеня циліндру високого тиску (ЦВТ) парової турбіни на просторову структуру потоку та аеродинамічні характеристики проточної частини

Ключові слова: коловий навал лопаток (шаблеподібність), осевий навал лопаток (стрілоподібність), надбандажні та між-дискові перетікання

Представлены результаты численного исследования и полученные на его основе закономерности влияния окружного и осевого навалов (саблевидности и стреловидности) рабочих и направляющих лопаток ступени цилиндра высокого давления (ЦВД) паровой турбины на пространственную структуру потока и аэродинамические характеристики проточной части

Ключевые слова: окружной навал лопаток (саблевидность), осевой навал лопаток (стреловидность), надбандажные и меж-дисковые перетекания

The results are presented for numerical study of influence HP active steam turbine blades lean and sweep on its gasdynamic characteristics. The main lean and sweep influences on the structure of stream and local descriptions of turbine cascade are established

Key words: blades lean, blades sweep, abov-ebracer and interdisks flows

А. В. Русанов

Доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Інститут проблем машинобудування ім. А.Н. Подгорного
НАН України
вул. Д.Пожарського, 2/10, м. Харків, 61046
Контактний тел.: (0572) 752-33-88
E-mail: rusanov@ipmach.kharkov.ua.org

Є. В. Левченко

Кандидат технічних наук, генеральний конструктор*

В. Л. Швецов

Головний конструктор парових і газових турбін*
*ВАТ "Турбоатом"
просп. Московський, 199, м. Харків, 61037
Контактний тел.: (0572) 349-23-50
E-mail: inform@turboatom.com.ua

Ю. П. Волков

Науковий співробітник
Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана
Кожедуба
вул. Сумська, 77/79, г. Харків, 61023
Контактний тел. (066) 135-20-46
E-mail: vyurii@mail.ru

Вступ

У каналах турбінних решіток за рахунок просторової структури потоку виникають вторинні течії, які є додатковим джерелом втрат кінетичної енергії (кін-

цевих втрат). Вивченню вторинних течій присвячено ряд експериментальних робіт [1, 2, 3 та інші], в яких наведено детальний опис, представлено візуалізацію і схематизовано структуру цих явищ. У ступенях з малою відносною висотою лопаток, що застосовують-

ся, наприклад, у ЦВТ парових турбін, внесок кінцевих втрат у сумарні втрати досить значний. Більшу частину цих досліджень присвячено встановленню впливу просторового профілювання лопаток на структуру потоку в напрямних апаратах (НА) [4, 5]. У той же час у ступенях активного типу кінцеві втрати значно вищі в каналах роторів у порівнянні зі статорами. У роботі наведено результати чисельного дослідження впливу складних колового і осьового навалів (шаблеподібності та стрілоподібності) робочих та напрямних лопаток ЦВТ парової турбіни на просторову структуру потоку та аеродинамічні характеристики ступенів активного типу.

Дослідження виконано за допомогою програмного комплексу FlowER [6], який ретельно апробовано при вивченні течій в'язкого газу у проточних частинах турбомашин [7, 8].

Постановка задачі

Як об'єкт дослідження розглянуто модернізований 6-й ступінь активного типу ЦВТ парової турбіни К-325 [9]. На рис. 1 надано ілюстрацію розрахункової області об'єкта дослідження. Геометричні характеристики ступеня наведені в табл. 1.

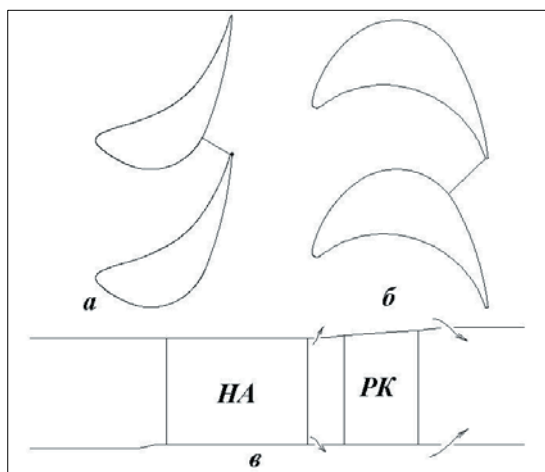


Рис. 1. Вид проточної частини: а – напрямний апарат; б – робоче колесо (РК); в – меридіональний перетин

Розрахунки виконано на сітках із сумарним числом комірок $2 \times 80 \times 80 \times 128 = 1638400$ за таких умов: частота обертання ротора – 3000 об/хв; повна температура на вході – 698,29 К; повний тиск на вході – 11,22 МПа; статичний тиск на виході – 9,77 МПа.

Таблиця 1

Геометричні характеристики ступеня

Параметр	Статор	Ротор
Відносна довжина лопатки, l/b	0,55	1,48
Відносний шаг решітки, t/b	0,74	0,8
Віялоподібність решітки, D_{cp}/l	18,0	17,2
Число лопаток, z	42	90
Ефективний кут виходу потоку $\alpha_{1ef}, \beta_{2ef}$, град	13,71	20,16

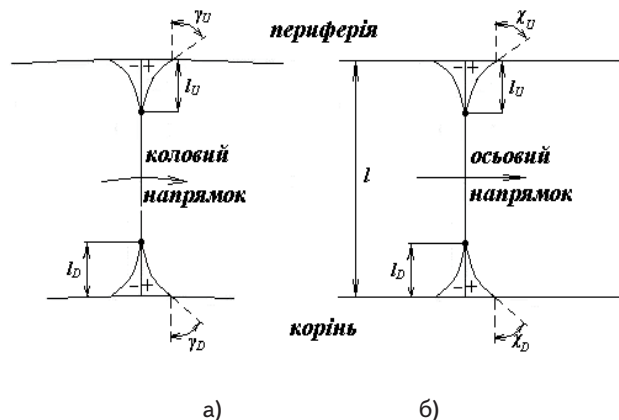


Рис. 2. Схема складного навалу лопаток: а) – коловий навал; б) – осьовий навал

Просторова форма лопаток утворювалась складним навалом у коловому та осьовому напрямках за рахунок надання вісі лопатки форми кривої другого порядку, що задається кутами навалу γ, χ та довжиною ділянки лопатки складної форми \bar{l} (див. рис.2):

$$\bar{l}_{u,D} = \frac{l_{u,D}}{l} = 100\%$$

Розрахунки проведено у двох постановках – з урахуванням та без урахування надбандажних і міждисккових перетікань.

Модельовання надбандажних і міждисккових перетікань надає більш наближену до реальних умов картину обтікання. Розрахунки, у яких не враховуються перетікання потоку, є більш придатними для дослідження впливу просторової форми лопаток на структуру течії та аеродинамічні характеристики проточної частини.

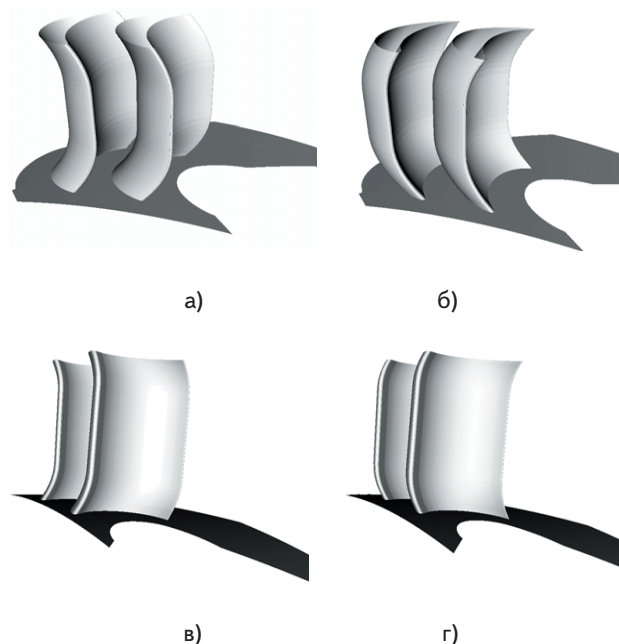


Рис. 3. Лопатки зі складним навалом: а) – шаблеподібна лопатка у формі сідла; б) – шаблеподібна лопатка у формі вітрила; в) – стрілоподібна лопатка з навалом проти потоку; г) – стрілоподібна лопатка з навалом по потоку

На рис. 3 наведено приклади лопаток, виконаних зі складним навалом у коловому та осьовому напрямках. Для спрощення опису результатів дослідження у статті використано незагальноживані терміни, а саме: “шаблеподібні лопатки” – лопатки зі складним навалом у коловому напрямку; “шаблеподібні лопатки у формі сидла” – лопатки зі складним навалом у коловому напрямку з нахилом з боку тиску на бік розрідження (рис. 3, а); “шаблеподібні лопатки у формі вітрила” – лопатки зі складним навалом у коловому напрямку з нахилом з боку розрідження на бік тиску (рис. 3, б); “стрілоподібні лопатки” – лопатки зі складним навалом в осьовому напрямку (рис. 3, в, г).

Комплексне просторове профілювання лопаток ЦВТ парової турбіни

У попередніх дослідженнях встановлено вплив окремих типів просторового профілювання лопаток НА та робочих коліс (РК) ступеня турбіни.

Результати цих досліджень детально описані в роботах [10-13]. На основі аналізу впливу окремих параметрів просторового профілювання лопаток на структуру течії та втрати кінетичної енергії було розроблено ступінь, загальний вигляд якого представлено на рис. 4. Цей ступінь має НА та РК з лопатками стрілоподібної та шаблеподібної форми як біля кореня, так і на периферії з такими параметрами: $\chi_D = -20^\circ$, $\bar{I}_D = 25\%$, $\gamma_D = 50^\circ$, $\bar{I}_D = 25\%$, $\chi_U = 20^\circ$, $\bar{I}_U = 50\%$, $\gamma_U = 50^\circ$, $\bar{I}_U = 25\%$ – для НА; $\chi_D = -30^\circ$, $\bar{I}_D = 25\%$, $\gamma_D = -35^\circ$, $\bar{I}_D = 25\%$, $\chi_U = -30^\circ$, $\bar{I}_U = 25\%$, $\gamma_U = 35^\circ$, $\bar{I}_U = 25\%$ – для РК.

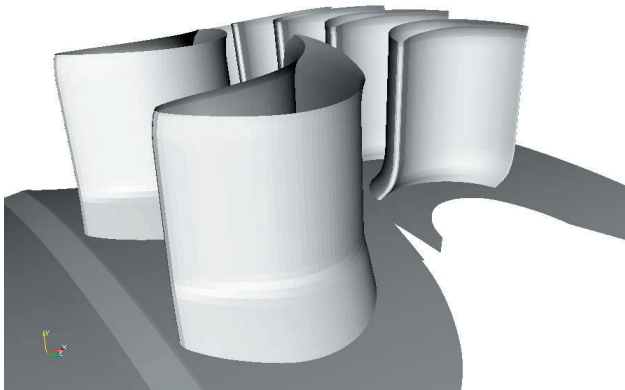


Рис. 4. Загальний вигляд ступеня зі складною формою лопаток НА та РК

Сумарний виграш за втратами кінетичної енергії для цього ступеня склав 0,292% для розрахунків без урахування перетікань та 0,081% для розрахунків з урахуванням перетікань.

Розподіл втрат кінетичної енергії у ступені для розрахунків без урахування перетікань представлено на рис. 5.

Як видно з рис. 5, найбільш суттєве зниження втрат кінетичної енергії досягається біля кореня. Таке зниження втрат реалізувалось внаслідок зменшення площі поширення та інтенсивності прикореневого каналного вихору в РК.

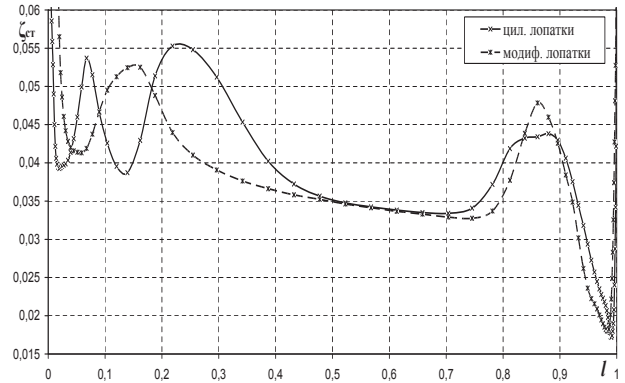


Рис. 5. Втрати кінетичної енергії у ступені зі складною формою лопаток НА та РК

Як описано у працях [10-13], це спричинено стрілоподібністю лопаток РК проти потоку. Шаблеподібність лопаток РК у формі вітрила біля кореня мала призвести до збільшення площі каналного вихору та зменшення його інтенсивності, але, як можна побачити на рис. 5, зменшення інтенсивності вихору реалізувалось, а збільшення його площі – ні. Зменшення площі поширення каналного вихору відбулося внаслідок переважаючого позитивного впливу стрілоподібності лопаток РК.

Крім того, у модифікованому ступені біля кореня немає максимуму втрат кінетичної енергії, пов'язаного з рециркуляційним каналним вихором, причиною цього є застосування лопаток НА з шаблеподібністю у формі сидла та стрілоподібністю проти потоку біля кореня.

Суттєвого зниження втрат кінетичної енергії біля периферії не спостерігається. Видно, що площа поширення каналного вихору зменшилась, але при цьому зростає його інтенсивність.

Внаслідок застосування складної форми просторового профілювання лопаток відбулося збільшення реактивності ступеня (рис. 6), що також позитивно вплинуло на зменшення втрат кінетичної енергії.

Аналіз результатів показав, що для ступенів активного типу більш суттєвим є вплив стрілоподібності у порівнянні з шаблеподібністю та просторове профілювання лопаток РК у порівнянні з просторовим профілюванням лопаток НА.

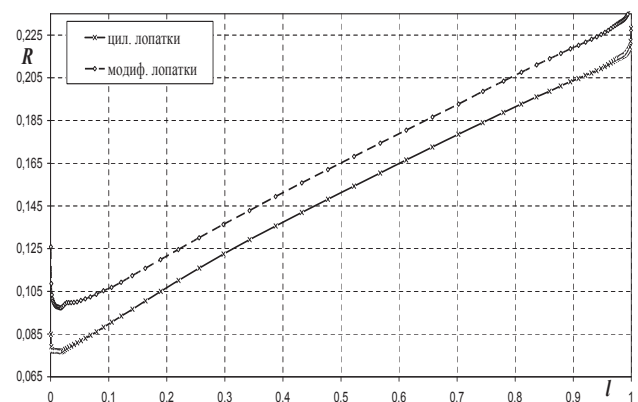


Рис. 6. Реактивність ступеня зі стрілоподібними та шаблеподібними лопатками НА та РК

Висновки

У результаті дослідження встановлено основні механізми впливу параметрів просторового профілювання лопаток ротору та статора на структуру течії й розроблено ступінь з меншими втратами кінетичної енергії. Однак зниження втрат кінетичної енергії внаслідок застосування окремих видів просторового профілювання в ступені у деяких випадках було більш значним, у порівнянні з комплексним застосуванням просторового профілювання в ступені. Це зайвий раз свідчить про необхідність використання методів оптимізації при проектуванні ступенів турбін із застосуванням просторового профілювання лопаток.

Література

1. Сивердинг К. Современные достижения в исследовании основных особенностей вторичных течений турбинных решеток // Тр. амер. об-ва инж. - мех. Энергет. машины и установки. – 1985. – Т. 107. – № 2. – С. 1–13.
2. Ходсон Х.П. Пространственное течение в решетке профилей турбины низкого давления на расчетном режиме / Х.П. Ходсон, Р.Дж. Домини // Тр. амер. о-ва инж.-мех. Энергет. машины и установки. – 1988 № 2. – С. 116–126.
3. Лэнгстон Л.С. Трехмерное течение в канале турбинной решетки / Л.С. Лэнгстон, М.Л. Найс, К.М. Хупер // Тр. амер. о-ва инж. - мех. Энергет. машины и установки. – 1977. – № 1. – С. 22–31.
4. Denton J.D. Learning flow physics from turbomachinery flow calculations // ISAIF/93. – Proceedings of the Int. Symp. on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows. – SCMP Publication – 1993. – P. 23–51.
5. Gnesin V.I. Investigation of flow through turbine stages with compound leaned blading by means of 3D viscous and inviscid flow models / V.I. Gnesin, S.V. Yershov, A.V. Rusanov, A. Gardzilewicz // 3rd Int. Symp. on Aerothermodynamics of Internal Flows, (Eds. S.Yu, N.Chen, Y.Bai) Beijing, China, 1-6 Sept., 1996, World Publishing Corporation, Beijing, 1996. – 8 p.
6. Ершов С.В. Комплекс програм розрахунку тривимірних течій газу в багатовінцевих турбомашинах “FLOWER” / С.В. Ершов, А.В. Русанов: Свідоцтво про державну реєстрацію прав автора на твір, ПА № 77. Державне агентство України з авторських та суміжних прав, 19.02.1996.
7. Lampart P. Validation of a 3D RANS Solver With a State Equation of Thermally Perfect and Calorically Imperfect Gas on a Multi-Stage Low-Pressure Steam Turbine Flow/ P. Lampart, A. Rusanov, S. Yershov, S. Marcinkowski, A. Gardzilewicz // Transactions of the ASME. Journal of Fluids Engineering. – 2005. – 127, № 1, January. – P. 83–93.
8. Lampart P. Validation of turbomachinery flow solver on turbomachinery test cases / P. Lampart, S. Yershov, A. Rusanov // International conference SYMKOM'02: Compressor & turbine stage flow path theory, experiment & user verification, Ciepne Maszyny Przeplywowe. Turbomachinery., Politechnika Lodzka, Lodz, Poland. – 2002, No. 122. – P. 63–70.
9. Ершов С.В. Аэродинамическое совершенствование проточной части ЦВД паровой турбины на основе расчетов трехмерного вязкого течения / С.В. Ершов, А.В. Русанов, В.А. Яковлев // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2006. – 4, №2. – С. 100–106.
10. Русанов А.В. Влияние сложного окружного навала лопаток ЦВД паровой турбины на структуру пространственного потока. / А.В. Русанов, Ю.П. Волков // Вестник Инженерной академии Украины. – 2007. – № 3. – С. 242–248.
11. Русанов А.В. Влияние сложного осевого навала лопаток ЦВД паровой турбины на структуру пространственного потока. / А.В. Русанов, Ю.П. Волков // Проблемы машиностроения. – 2008. – № 2(11). – С. 8-14
12. Русанов А.В. Вплив складного навалу лопаток ЦВД парової турбіни на структуру просторового потоку. / А.В. Русанов, Ю.П. Волков, Г.П. Сігайло // Системи озброєння і військова техніка. – 2008. – №2(14). С. 99–103.
13. Русанов А.В. Влияние сложного навала рабочих и направляющих лопаток ЦВД паровой турбины на аэродинамические характеристики проточной части. / А.В. Русанов, Ю.П. Волков // Компрессорное та енергетичне машинобудування. – 2008. – №3. С. 93–97.