

УДК 621.165

А.В. Русанов, Ю.П. Волков, Г.П. Сігайло

*Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків*

## ВПЛИВ СКЛАДНОГО НАВАЛУ ЛОПАТОК ЦВТ ПАРОВОЇ ТУРБІНИ НА СТРУКТУРУ ПРОСТОРОВОГО ПОТОКУ

*Представлено результати чисельного дослідження впливу складних колового та осьового навалів (шаблеподібності та стрілоподібності) робочих і напрямних лопаток циліндру високого тиску (ЦВТ) парової турбіни на просторову структуру потоку та аеродинамічні характеристики проточної частини. Дослідження здійснювалися за допомогою програмного комплексу «FlowER», призначеного для розрахунків просторових в'язких течій у проточних частинах турбомашин. Встановлено загальні закономірності впливу різних форм складного навалу лопаток на структуру потоку та локальні характеристики проточної частини.*

**Ключові слова:** коловий навал лопаток (шаблеподібність), осьовий навал лопаток (стрілоподібність), надбандажні та міждискові перетікання.

### Вступ

У каналах турбінних решіток за рахунок просторової структури потоку виникають вторинні течії, які є додатковим джерелом втрат кінетичної енергії (кінцевих втрат). Вивченню вторинних течій присвячена низка експериментальних робіт [1, 2, 3 та ін], в яких наведено детальний опис, представлено візуалізацію і схематизовано структуру цих явищ. У ступенях з малою відносною висотою лопаток, що застосовуються, наприклад, у ЦВТ парових турбін, внесок кінцевих втрат у сумарні втрати досить значний. Більша частина досліджень присвячена з'ясуванню 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 надано 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.

Чисельне дослідження виконано за допомогою програмного комплексу **FlowER** [6], який ретельно апробовано при вивченні течій в'язкого газу у проточних частинах турбомашин [7, 8]. Основні елементи математичної моделі та характеристики комплексу програм **FlowER** наступні: осереднені за Рейнольдсом нестационарні рівняння Нав'є-Стокса; двохпараметрична диференційна модель турбулентності SST Ментера [9]; неявна квазімонотонна ENO-схема підвищеної точності [10]; має достатню достовірність результатів, що отримуються як за якісною структурою тривимірних в'язких течій, так і за кількісною оцінкою характеристик турбомашини. Похибка розрахунку втрат кінетичної енергії та ККД ступенів турбіни складає близько 0,5–1% (абсолютних) [8];

– добре зарекомендував себе при проектуванні та модернізації лопаткових машин [8];

– використовується низкою підприємств України, Росії та Польщі при розробці турбомашин.

### Постановка задачі

Як об'єкт дослідження розглянуто ступень активного типу ЦВТ (6-а ступень турбіни К-325), модерніза-

цію якої було виконано раніше [11]. На рис. 1 наведено ілюстрацію розрахункової області. Геометричні характеристики ступені наведені в табл. 1.

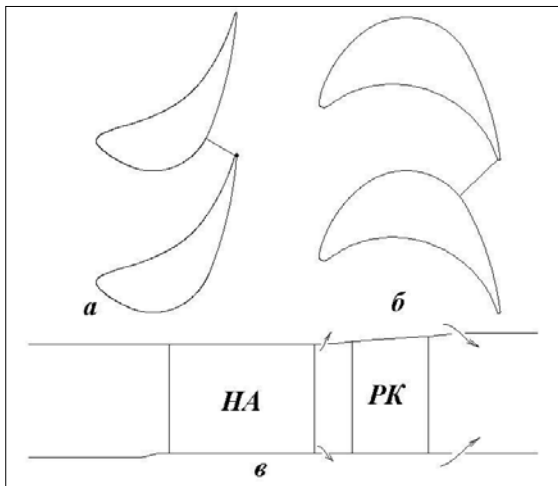


Рис. 1. Видяг проточної частини: а – напрямний апарат; б – робоче колесо (РК); в – меридіональний перетин

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 ступені

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
Кількість лопаток, $z$	42	90
Ефективний кут виходу потоку $\alpha_{1ef}$ , $\beta_{2ef}$ , град	13,71	20,16

Розрахунки виконано у двох постановках – з урахуванням та без урахування надбандажних і міждисккових перетікань. Моделювання надбандажних та міждисккових перетікань дає більш наближену до реальних умов картину плинину.

Розрахунки, у яких не враховуються перетікання потоку, є більш придатними для дослідження впливу просторової форми лопаток на структуру течії та аеродинамічні характеристики проточної частини.

У роботі розглянуто впливи простого і складного навалів лопаток статора та ротора в осьовому й коловому напрямках. Складний навал лопаток у коловому або осьовому напрямках утворюється за рахунок надання вісі лопатки форми кривої другого порядку, котра задається кутами навалу  $\gamma$ ,  $\chi$  та довжиною ділянки лопатки складної форми  $\bar{l}$  (рис. 2):

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

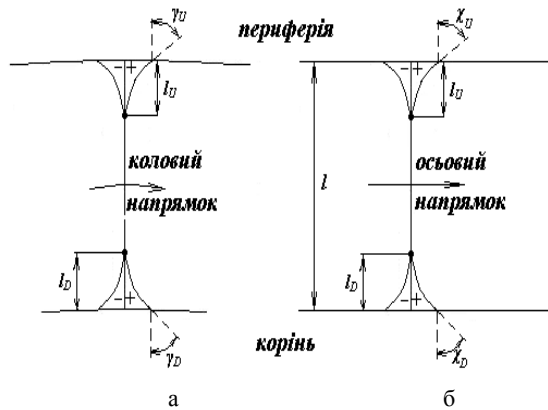


Рис. 2. Схема складного навалу лопаток: а – коловий навал; б – осьовий навал

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

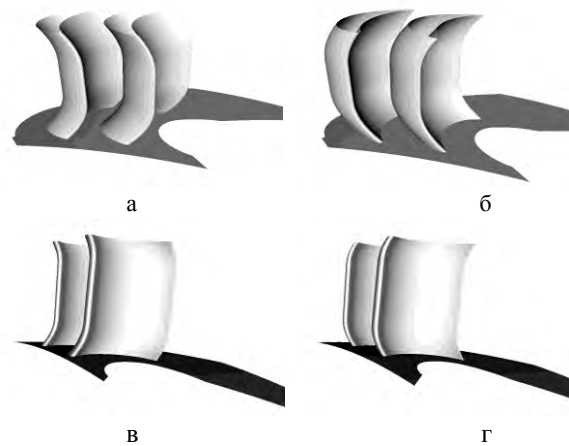


Рис. 3. Лопатки зі складним навалом: а – шаблеподібна лопатка у формі сідла; б – шаблеподібна лопатка у формі вітрила; в – стрілоподібна лопатка з навалом проти потоку; г – стрілоподібна лопатка з навалом по потоку

### Коловий навал лопаток

Вплив навалу лопаток у коловому напрямку на структуру потоку, перш за все, пов'язаний із тим, що відбувається перерозподіл поля тиску (рис. 4), внаслідок чого утворюються додаткові градієнти тиску у порівнянні з прямою лопаткою. Ці градієнти тиску спричиняють основний вплив на зміну структури вторинних течій та розподіл реактивності ступені за висотою лопатки. Як видно з рис. 4, а, при нахилі лопаток у коловому напрямку положення ізоліній тиску

відносно торцевих поверхонь не зазнає суттєвих змін. Це пов'язано з тим, що радіальний градієнт тиску, в основному, визначається умовою радіальної рівноваги, тобто величиною колової швидкості, яка мало залежить від колового навалу. Таким чином, при навалі лопаток виникають додаткові градієнти тиску (рис. 4, б).

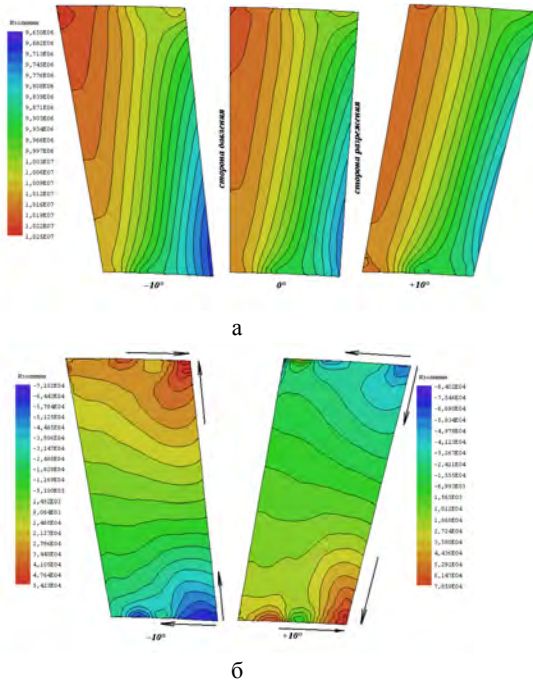


Рис. 4. Поперечний перетин міжлопаткового каналу робочих колес: а – ізолінії статичного тиску; б – ізолінії різниць статичного тиску між каналом з прямими лопатками та каналами з коловим навалом лопаток

Розглянуто конструкції ступенів із наступними геометричними характеристиками шаблеподібності лопаток статора і ротора:  $\bar{\Gamma}_{U,D} = 12,5\%, 25\%, 37,5\%$ ,  $\gamma_{U,D} = \pm 20^\circ, \pm 35^\circ, \pm 50^\circ$ .

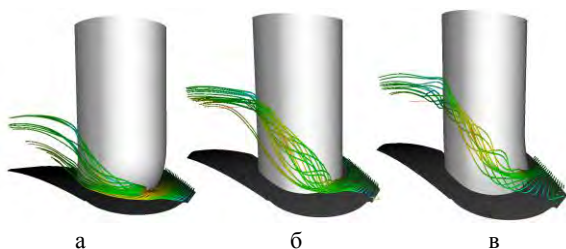


Рис. 5. Візуалізація ліній току в каналах із лопатками різної форми шаблеподібності: а – лопатка у формі вітрила у кореня; б – пряма лопатка; в – лопатка у формі сідла у кореня

Встановлено, що для шаблеподібних лопаток у формі вітрила каналний вихор менше просувається до середини каналу в радіальному напрямку у порівнянні з прямою лопаткою (рис. 5, а). Це пов'язано з тим, що в такому випадку на стороні розрідження лопатки виникає градієнт тиску, який притискає потік до торцевих поверхонь. Зворотна картина спостерігається для шаблеподібних лопа-

ток у вигляді сідла (рис. 5, в). Розподіл втрат кінетичної енергії за висотою каналу для різних форм шаблеподібності лопаток наведено на рис. 6.

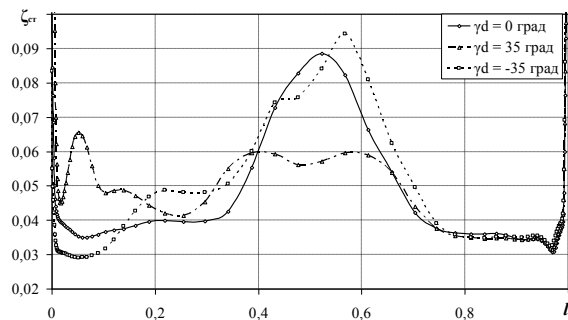


Рис. 6. Розподіл втрат кінетичної енергії у ступені з шаблеподібними лопатками РК за висотою каналу при  $\bar{\Gamma}_D = 25\%$

У випадку шаблеподібності лопаток у вигляді сідла ( $\gamma_D = 35^\circ$ ) периферійний та кореневий каналні вихори не зникаються, що приводить до значного зменшення втрат кінетичної енергії у середніх перетинах, але при цьому зростають втрати біля втулки, де лопатка має шаблеподібну форму у вигляді сідла. На рис. 7 представлено графік зміни втрат кінетичної енергії у ступені в залежності від кута колового навалу лопаток РК біля кореня за умови відсутності надбандажних і міждисккових перетікань. Подібний характер залежностей спостерігається при різній довжині шаблеподібної ділянки лопатки, але у випадку більших значень  $\bar{\Gamma}_D$  мінімуми втрат досягаються при менших за модулем кутах  $\gamma_D$ . Має місце нелінійний характер впливу кута колового навалу. Мінімуми функції втрат кінетичної енергії досягаються як за шаблеподібності лопаток у формі вітрила, так і за шаблеподібності у формі сідла.

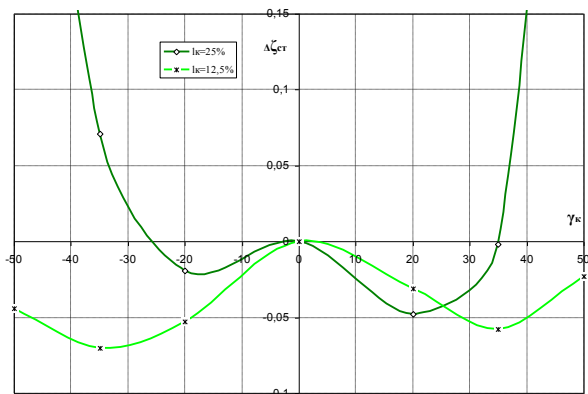


Рис. 7. Залежність втрат кінетичної енергії у ступені від кута шаблеподібності лопаток РК за умови відсутності надбандажних і міждисккових перетікань

При врахуванні надбандажних і міждисккових перетікань посилюється нелінійність впливу колового кута навалу лопаток, що пов'язано зі зростанням товщини примежових шарів та з ускладненням структури вторинних течій. Проте і в цьому випадку досягається позитивний результат від використання шаблеподібних лопаток РК.

На рис. 8 надано графік зміни втрат кінетичної енергії у ступені в залежності від кута колового навалу лопаток НА біля кореня за умови відсутності надбандажних і міждисккових перетікань. Спостерігається більш суттєвий вплив шаблеподібності лопаток НА на потік у каналі ротора та характеристики ступені в цілому у порівнянні з шаблеподібністю лопаток РК. Залежність втрат кінетичної енергії у ступені від кута колового навалу лопаток НА, як і у випадку з РК, є нелінійною. При шаблеподібності лопаток НА у формі сідла підвищується реактивність ступені, а за навалу у формі вітрила зменшується товщина примежового шару на меридіональному обводі перед РК. Обидва ці фактори можуть привести до зменшення втрат кінетичної енергії потоку.

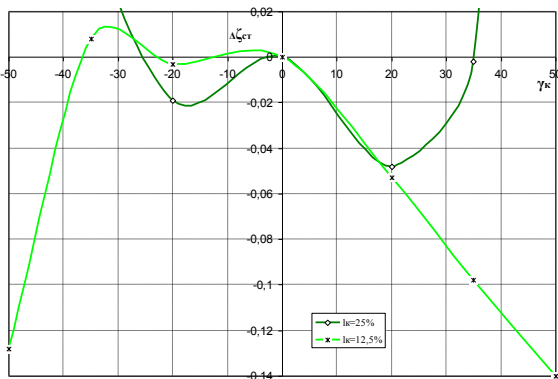


Рис. 8. Залежність втрат кінетичної енергії у ступені від кута шаблеподібності лопаток НА за умови відсутності надбандажних та міждисккових перетікань

У випадку врахування міждисккових і надбандажних перетікань нелінійний характер залежності втрат від кута шаблеподібності лопаток НА посилюється. Зниження втрат кінетичної енергії досягається при шаблеподібності у вигляді сідла, коли відбувається зменшення товщини примежового шару перед РК.

З розглянутих варіантів складного колового навалу у постановці з урахуванням надбандажних і міждисккових перетікань найбільшого зменшення втрат – на 0,41% було досягнуто при  $\gamma_D=35^\circ$ ,  $\bar{l}_D=25\%$ ,  $\gamma_U=35^\circ$ ,  $\bar{l}_U=37,5\%$  для лопаток НА та  $\gamma_D=50^\circ$ ,  $\bar{l}_D=37,5\%$ ,  $\gamma_U=50^\circ$ ,  $\bar{l}_U=37,5\%$  для лопаток РК. За умови відсутності перетікань зменшення втрат складало 0,17% при  $\gamma_D=50^\circ$ ,  $\bar{l}_D=12,5\%$ ,  $\gamma_U=50^\circ$ ,  $\bar{l}_U=12,5\%$  для лопаток НА та  $\gamma_U=50^\circ$ ,  $\bar{l}_U=12,5\%$  для лопаток РК.

### Осьовий навал лопаток

Вплив осьового навалу лопаток на структуру потоку і, перш за все, на структуру вторинних течій, як і у випадку з коловим навалом, пов'язаний з перерозподілом поля тиску (рис. 9). За рахунок осьового навалу виникають додаткові градієнти тиску в радіальному напрямі, які сприяють перетіканням потоку по висоті в залежності від форми осьового навалу.

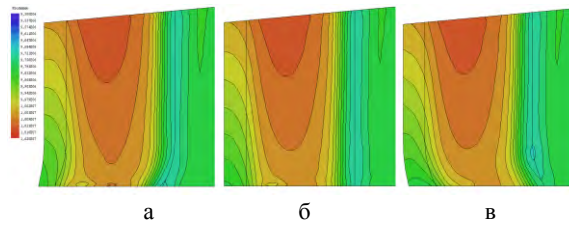


Рис. 9. Ізолінії статичного тиску; середній меридіональний перетин міжлопаткового каналу РК: а –  $\bar{l}_D=25\%$ ,  $\chi_D=-30^\circ$ ; б – пряма лопатка; в –  $\bar{l}_D=25\%$ ,  $\chi_D=30^\circ$

На рис. 10 наведено розподіл втрат кінетичної енергії за висотою каналу для різних форм стрілоподібності лопаток. У випадку стрілоподібності лопаток проти потоку ( $\chi_D=20^\circ$ ) виникає градієнт тиску, який притискає каналний вихор до торцевої поверхні, це приводить до зменшення втрат кінетичної енергії у середніх перетинах, але при цьому зростають втрати біля втулки, де лопатка має осьовий навал проти потоку.

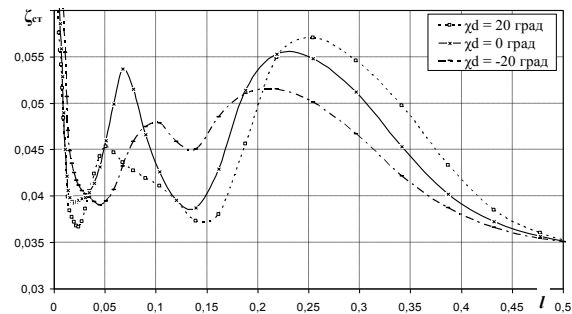


Рис. 10. Розподіл втрат кінетичної енергії за висотою каналу у ступені зі стрілоподібними лопатками РК при  $\bar{l}_D=25\%$

Графік зміни втрат кінетичної енергії у ступені в залежності від кута осьового навалу лопаток РК біля кореня та периферії за умови відсутності надбандажних та міждисккових перетікань представлено на рис. 11. Якісний характер розподілу втрат майже не залежить від довжини стрілоподібної ділянки лопатки. Спостерігається нелінійний характер впливу кута осьового навалу. Мінімуми функції втрат кінетичної енергії досягаються як за стрілоподібності лопаток на периферії проти потоку, так і по потоку. Біля кореня зменшення втрат кінетичної енергії досягається за осьового навалу лопаток проти потоку.

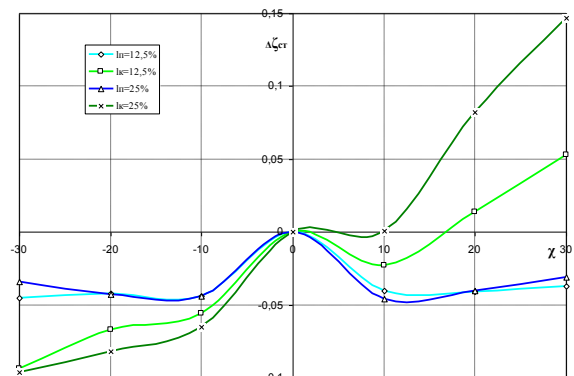


Рис. 11. Залежність втрат кінетичної енергії у ступені від кута стрілоподібності лопаток РК за умови відсутності надбандажних і міждисккових перетікань

При врахуванні надбандажних і міждисккових перетікань посилюється нелінійність впливу осьового кута навалу лопаток, що пов'язано зі зростанням товщини примежових шарів та з ускладненням структури вторинних течій. Зменшення втрат від використання стрілоподібних лопаток РК для розглянутої ступені не отримано.

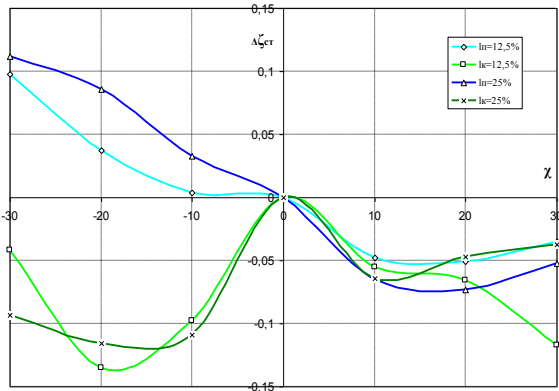


Рис. 12. Залежність втрат кінетичної енергії у ступені від кута стрілоподібності лопаток НА за умови відсутності надбандажних і міждисккових перетікань

На рис. 12 надано графік зміни втрат кінетичної енергії у ступені в залежності від кута осьового навалу лопаток НА без урахування надбандажних і міждисккових перетікань. При стрілоподібності лопаток статора по потоку примежовий шар на меридіональному обводі перед РК стає тоншим. Це зменшує вторинні течії, однак при цьому зменшується реактивність ступені, що може спричинити підвищення втрат кінетичної енергії.

З розглянутих варіантів складного осьового навалу в постановці з урахуванням надбандажних і міждисккових перетікань найбільшого зменшення втрат – на 0,1%, було досягнуто при  $\chi_D = -10^\circ$ ,  $\bar{h}_D = 12,5\%$ ,  $\chi_U = 30^\circ$ ,  $\bar{h}_U = 25\%$  для лопаток НА та  $\chi_D = -30^\circ$ ,  $\bar{h}_D = 25\%$  для лопаток РК. За умови відсутності перетікань зменшення втрат складало 0,25% при  $\chi_D = -20^\circ$ ,  $\bar{h}_D = 12,5\%$ ,  $\chi_U = 20^\circ$ ,  $\bar{h}_U = 25\%$  для лопаток НА та  $\chi_D = -30^\circ$ ,  $\bar{h}_D = 25\%$ ,  $\chi_U = -30^\circ$ ,  $\bar{h}_U = 12,5\%$  для лопаток РК.

## Висновки

- встановлено загальні закономірності впливу різних форм складного навалу лопаток на структуру потоку та локальні характеристики проточної частини;
- вплив складного навалу лопаток на сумарні значення втрат кінетичної енергії та ККД є нелінійним і залежить від індивідуальних властивостей проточної частини;
- для аеродинамічного вдосконалення проточних частин з використанням складного навалу бажано застосовувати оптимізаційні методи;
- використання складного навалу лопаток дозволяє покращити аеродинамічні характеристики проточних частин навіть з високим рівнем ККД;

– просторове профілювання лопаток НА для розглянутої ступені головним чином впливає на вторинні течії та втрати кінетичної енергії у РК;

– просторові течії у ступенях активного типу суттєво залежать від параметрів примежового шару на меридіональних обводах перед РК.

## Список літератури

1. Сивердин 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. Хунер // 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. Єршов С.В. Комплекс програм розрахунку тривимірних течій газу в багатовіцевих турбомашинах "FlowER" / С.В. Єршов, А.В. Русанов: Свідчення про державну реєстрацію прав автора на твір, ПА № 77. Державне агентство України з авторських та суміжних прав, 19.02.1996.
7. Lampart P., Rusanov A., Yershov S., Marcinkowski S., Gardzilewicz A. 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 // Transactions of the ASME. Journal of Fluids Engineering. – 2005. – 127, № 1, January. – P. 83-93.
8. Lampart P., Yershov S., Rusanov A. Validation of turbomachinery flow solver on turbomachinery test cases // International conference SYMKOM'02: Compressor & turbine stage flow path theory, experiment & user verification, Cieplne Maszyny Przeplywowe. Turbomachinery., Politechnika Lodzka, Lodz, Poland. – 2002, No. 122. – P. 63-70.
9. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA J. – 1994. – 32, № 8. – P. 1598-1605.
10. Єршов С.В. Численное моделирование турбулентных отрывных течений в пространственных решетках с использованием неявной ENO схемы С.К.Годунова / С.В. Єршов, А.В. Русанов // Пробл. машиностроения. – 1998. – 1, № 1. – С. 70-78.
11. Єршов С.В. Аэродинамическое совершенствование проточной части ЦВД паровой турбины на основе расчетов трехмерного вязкого течения / С.В. Єршов, А.В. Русанов, В.А. Яковлев // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2006. – 4, №2. – С. 100-106.

Надійшла до редколегії 10.06.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.Л. Шубенко, Інститут проблем машинобудування НАН України, Харків.

## ВЛИЯНИЕ СЛОЖНОГО НАВАЛА ЛОПАТОК ЦВД ПАРОВОУЙ ТУРБИНЫ НА СТРУКТУРУ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОТОКА

А.В. Русанов, Ю.П. Волков, Г.П. Сигайло

*Представлены результаты численного исследования влияния сложного окружного и осевого навала (саблевидности и стреловидности) рабочих и направляющих лопаток цилиндра высокого давления (ЦВД) паровой турбины на пространственную структуру потока и аэродинамические характеристики проточной части. Исследование осуществлялось с помощью программного комплекса «FlowER», предназначенного для расчета пространственных вязких течений в проточных частях турбомашин. Установлены основные закономерности влияния различных форм сложного навала лопаток на структуру потока и локальные характеристики проточной части.*

**Ключевые слова:** *окружной навал лопаток (саблевидность), осевой навал лопаток (стреловидность), надбандажные и междисковые протечки.*

## THE INFLUENCE OF HP ACTIVE STEAM TURBINE BLADES LEAN AND SWEEP ON THE STRUCTURE OF 3D FLOWING.

A.V. Rusanov, Yu.P. Volkov, G.P. Sihaylo

*The results are presented for numerical study of influence HP active steam turbine blades lean and sweep on its gasdynamic characteristics. The investigations have been performed with solver FlowER, intended for numerical simulation of 3D viscous flows through multistage turbomachinery. The main lean and sweep influences on the structure of stream and local descriptions of turbine cascade are established.*

**Keywords:** *blades lean, blades sweep, abovebracer and interdisks flows.*