

УДК 621.165:532.6

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОСТАНЬОГО СТУПЕНЯ ЦИЛІНДРА НИЗЬКОГО ТИСКУ ПАРОВОЇ ТУРБИНИ ЗА РАХУНОК ПРОСТОРОВОГО ПРОФІЛЮВАННЯ ЛОПАТОК

<sup>1</sup> А. В. Русанов, член-кор. НАН України[rusanov@ipmach.kharkov.ua](mailto:rusanov@ipmach.kharkov.ua)

ORCID: 0000-0003-1345-7010

<sup>2</sup> В. Л. Швецов, канд. техн. наук[shvetsov@turboatom.com.ua](mailto:shvetsov@turboatom.com.ua)

ORCID: 0000-0002-2384-1780

<sup>1,3</sup> С. В. Альохіна, д-р техн. наук[alyokhina@ipmach.kharkov.ua](mailto:alyokhina@ipmach.kharkov.ua)

ORCID: 0000-0002-2967-0150

<sup>1</sup> Н. В. Пащенко, канд. техн. наук[nata\\_y@ukr.net](mailto:nata_y@ukr.net)

ORCID: 0000-0002-3936-7331

<sup>1</sup> Р. А. Русанов, канд. техн. наук[roman\\_rusanov@ipmach.kharkov.ua](mailto:roman_rusanov@ipmach.kharkov.ua)

ORCID: 0000-0003-2930-2574

<sup>2</sup> М. Г. Іщенко[ischenko-mg@turboatom.com.ua](mailto:ischenko-mg@turboatom.com.ua)

ORCID: 0000-0003-2251-5104

<sup>2</sup> Л. О. Сластьон[kalembet@i.ua](mailto:kalembet@i.ua)

ORCID: 0000-0002-9268-8134

<sup>2</sup> Р. Б. Шерфедінов[rizasherfedinov@gmail.com](mailto:rizasherfedinov@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-5947-7802

<sup>1</sup> Інститут проблем машинобудуванняім. А. М. Підгорного НАН України,  
61046, Україна, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10<sup>2</sup> Акціонерне товариство «Турбоатом»,  
61037, Україна, м. Харків, пр. Московський, 199<sup>3</sup> Харківський національний університет  
імені В. Н. Каразіна,  
61000, Україна, м. Харків, майдан Свободи, 4

В роботі наведено варіант удосконалення проточної частини циліндра низького тиску (ЦНТ) парової конденсаційної турбіни К-325-23,5 (серія К-300) за рахунок модернізації останнього ступеня. Турбіна К-325-23,5 розроблена для заміни застарілих турбін серії К-300, які разом з турбінами серії К-200 складають основу теплової енергетики України. В модернізованій проточній частині застосовані нові лопатки направляючого апарата останнього ступеня зі складним коловим навалом біля кореня. Метою модернізації було збільшення ефективності ЦНТ на режимах «поганого» вакууму в конденсаторі з забезпеченням «незниження» його ефективності на номінальних режимах праці. Удосконалена проточна частина ЦНТ розроблена з використанням сучасних методів розрахунку в'язкої тривимірної течії, що ґрунтуються на числовому інтегруванні осереднених рівнянь Нав'є-Стокса. Для турбулентних ефектів застосовано двопараметричну модель турбулентності SST Менгера, а для врахування реальних властивостей робочого тіла – рівняння стану IAPWS-95. Для побудови тривимірної геометрії осьових лопаток використовувався оригінальний метод, вихідними даними для якого була обмежена кількість параметризованих величин. Застосовані методи газодинамічних розрахунків та проектування проточних турбомашин реалізовані в програмному комплексі *IPMFlow*, який є розвитком програмних комплексів *FlowER* і *FlowER-U*. Досліджувану проточну частину ЦНТ обмежено двома останніми ступенями (4-м та 5-м). Для побудови розрахункової області використано різницеву сітку з загальною кількістю елементарних об'ємів понад 3 млн. В процесі дослідження розглянуто більше 20 варіантів лопаток направляючого апарата останнього ступеня ЦНТ на номінальному режимі роботи приріст коефіцієнта корисної дії (ККД) склав 0,9 % й потужності – 0,61 МВт. На режимі з «поганим» вакуумом (з підвищеним тиском) у конденсаторі досягнуто значнішого приросту: ККД – на 11,5 %, потужність зростає майже на 2 МВт.

**Ключові слова:** просторове профілювання, числове моделювання, просторова течія, газодинамічна ефективність, парова турбіна, останній ступінь.

## Вступ

В Україні, незважаючи на великі темпи зростання «зеленої» енергетики, в загальному балансі електрогенерації значна частка припадає на парові турбіни ТЕС та ТЕЦ (близько 30 %). Крім того, через відсутність достатньої кількості ГЕС та ГАЕС енергоблоки теплових електростанцій виконують непритаманні їм функції регулюючих потужностей. В подальшому в Україні, відповідно до світових трендів, планується значне збільшення частки генерації з відновлювальних джерел енергії (сонце, вітер та ін.) [New Green Deal]. Відомо, що відновлювальні джерела енергії є нестабільними, і для їх інтеграції у об'єднану енергетичну систему необхідно мати достатню кількість не тільки маневрених, але й компенсуючих потужностей [1]. В умовах України цю функцію буде покладено на енергоблоки теплових електростанцій.

Більша частина існуючих в Україні енергоблоків теплових електростанцій виробила встановлений їй продовжений ресурси, вони потребують заміни на нові або докорінної реконструкції, перш за все це енергоблоки потужністю 200 та 300 МВт. Метою подібних робіт є не тільки забезпечення надійності енергетичного обладнання, а й підвищення його ефективності та зменшення негативного впливу на довкілля [2].

Одним з найбільш розповсюджених напрямів підвищення ефективності турбін є використання так званого просторового профілювання (складні навали лопаток). Дослідження та пропозиції щодо його застосування з'явилися вже досить давно [3, 4 та ін.], але їх практичне впровадження стало можливим після початку широкого застосування в процесах проектування тривимірних методів обчислювальної гідрогазодинаміки (3D CFD) [5, 6, 7 та ін.].

Використання складного навалу лопаток під час проектування проточних частин турбомашин відбувається за двома основними напрямками. Перший напрям застосовується для відносно коротких лопаток. Його метою є збільшення газодинамічної ефективності за рахунок зменшення кінцевих втрат. Цей напрям є досить популярним, ним займаються багато дослідників в наукових та конструкторсько-проектних організаціях [8, 9 та ін.]. Незважаючи на це, на думку авторів, зиск від використання цього підходу не є очевидним. Це пов'язано з тим, що заходи, спрямовані на зменшення кінцевих втрат, як правило, викликають збільшення інших втрат, наприклад профільних або кромкових [10]. Також досвід авторів свідчить, що використання сучасних підходів дає змогу забезпечити під час створення профілів лопаток індивідуально під кожну проточну частину дуже високий рівень ефективності без просторового профілювання [11]. Другий напрям застосовується для відносно довгих лопаток з метою вирівнювання газодинамічних характеристик потоку за висотою каналу. Найбільш доцільно використовувати цей підхід у останніх ступенях потужних конденсаційних парових турбін. Існують приклади, в яких цей підхід дав позитивний результат на режимах з «поганим» вакуумом у конденсаторі (збільшені значення тиску) [12], але при цьому залишається проблема забезпечення вихідних значень ефективності на номінальних режимах праці.

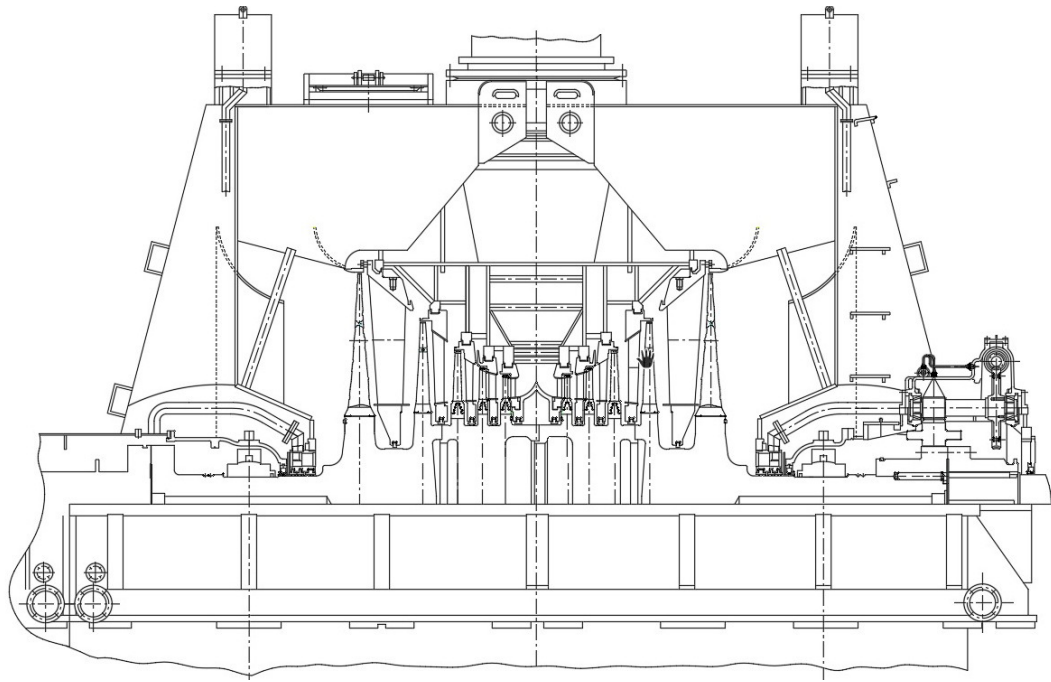
В статті розглянуті можливості удосконалення ЦНТ парової конденсаційної турбіни серії К-300 (модифікація К-325) за рахунок модернізації останнього ступеня з використанням сучасних методів розрахунку в'язких тривимірних течій та проектування проточних частин. Наведено варіант модернізації останнього ступеня, в якому використано складний навал лопаток направляючого апарата (НА).

## Об'єкт дослідження

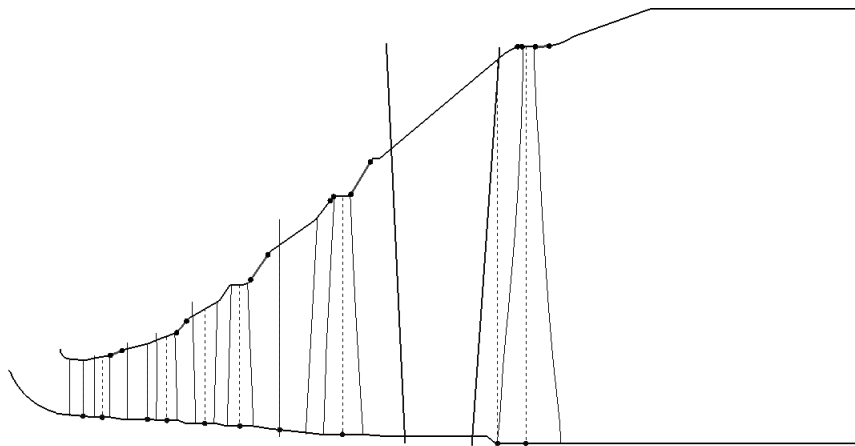
На рис. 1 наведено меридіональний перетин проточної частини ЦНТ парової турбіни К-325-23,5 виробництва АТ «Турбоатом». На рис. 2 зображено набори профілів, якими задаються лопатка НА та робочого колеса (РК) п'ятого ступеня, а також вид ізометрії лопаток НА.

## Методика проведення розрахунків

Розрахункову область обмежено двома останніми ступенями, які описуються скінченно-різницевою сіткою Н-типу. Розрахунки виконувались з припущенням, що течія у всіх міжлопаткових каналах одного вінця однакова (у циліндричній системі координат), тому й сітку було побудовано відповідним чином. Загальний розмір сітки складає понад 3 млн. елементарних об'ємів – комірок ( $90 \times 72 \times 108 + 90 \times 72 \times 108 + 90 \times 72 \times 108 + 90 \times 72 \times 148$ ).

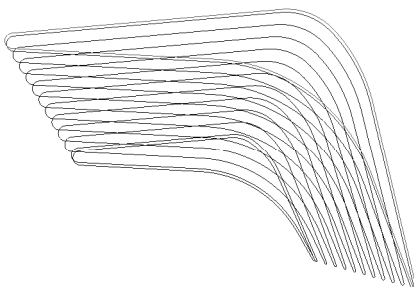


а

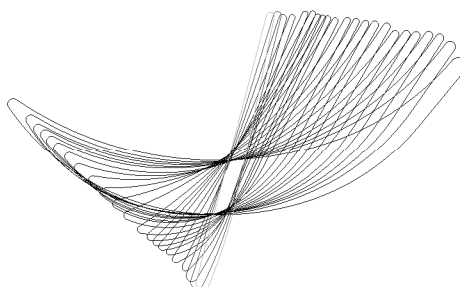


б

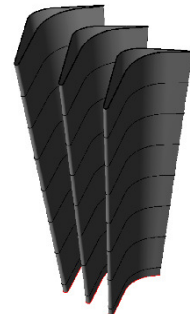
**Рис. 1. Меридіональний перетин ЦНТ парової турбіни К-325-23,5:**  
а – ескізне креслення; б – комп'ютерна модель у програмному комплексі *IPMFlow*



а



б



в

**Рис. 2. Вигляд профілів лопаток останнього ступеня:**  
а – НА; б – РК; в – ізометрія НА

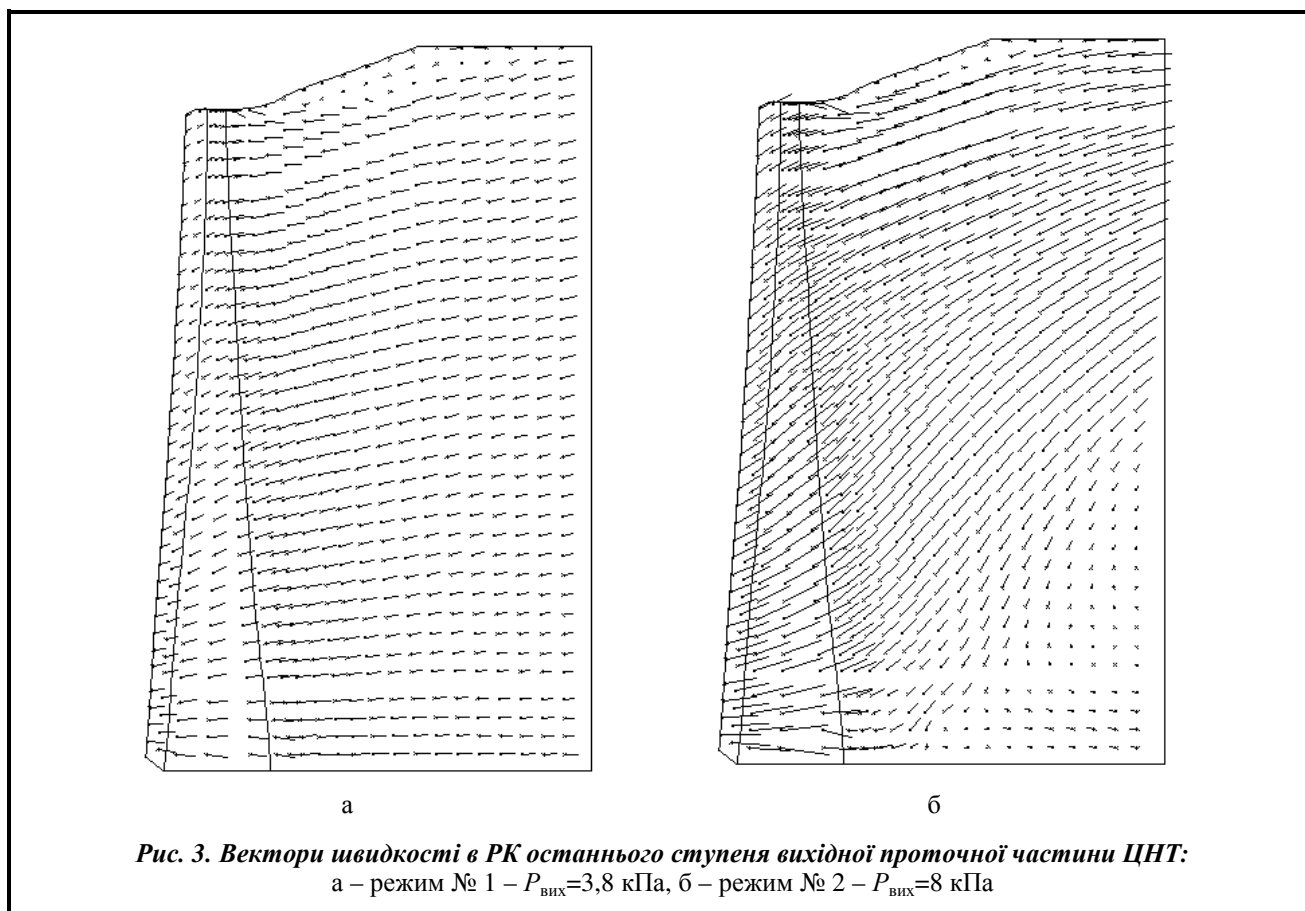
Проведено дослідження двох режимів роботи, які відрізняються один від одного значеннями тиску за останнім ступенем (в конденсаторі)  $P_{\text{вих}}=3,8$  кПа (режим № 1 – номінальний) та  $P_{\text{вих}}=8$  кПа (режим № 2). Теоретично у конденсаторі можуть бути й більші значення тиску, а турбіна розраховується на максимальне значення  $P_{\text{вих}}=12$  кПа, але згідно з керівними інструкціями, експлуатація турбіни за тисків на виході понад 8 кПа не допускається. Параметри на вході в розрахункову область (перед четвертим ступенем) задавались однакові – повний тиск  $P_{\text{вх}}=36,7$  кПа, повна температура  $T_{\text{вх}}=346,8$  К.

Під час моделювання враховано надбандажні перетоки та відбори пари. Оскільки останні два ступені працюють в зоні вологої пари, розрахунки виконувались з використанням рівняння стану IAPWS-95 [13] та методу його інтерполяційно-аналітичної апроксимації [14].

Моделювання просторових в'язких течій у проточній частині ЦНТ виконувалось за допомогою програмного комплексу *IPMFlow*, який є розвитком програмних комплексів *FlowER* і *FlowER-U* [15, 10]. Врахування турбулентних явищ здійснювалося з використанням двопараметричної диференціальної моделі турбулентності SST Ментера [16].

### Аналіз течії в останньому ступені вихідної проточної частини ЦНТ

На рис. 3 зображено візуалізацію течії на двох режимах роботи у РК останнього ступеня. Видно, що на режимі № 1 течія майже не має відривів потоку (рис. 3, а). Незначний локалізований відрив присутній на периферії ближче до виходу з розрахункової області. Його поява викликана значним «відкриттям» периферійного обводу. На режимі № 2 цей відрив зменшився, але з'явився значний потужний відрив біля кореневого меридіонального обводу (рис. 3, б). Він розповсюджується майже до половини висоти каналу на виході з розрахункової області. Така картина течії обумовлена тим, що при збільшенні тиску у конденсаторі зменшується теплове навантаження на ступінь і знижується його реактивність (рис. 4). При цьому через те, що для ступенів з відносно довгими лопатками (малими значеннями  $D/L$ ) характерним є суттєвий градієнт реактивності по висоті каналу, за його сумарного зниження, біля кореня він набуває негативної величини (рис. 4).



Негативна реактивність  $i$ , як наслідок, значний відрив потоку біля кореня, обумовлюють падіння ККД проточної частини. Так, на режимі № 1 ККД останнього ступеня з урахуванням втрат з вихідною швидкістю складає 78,8 %, без урахування – 88,8 %, а на режимі № 2 – 59,9 % та 81,2 % відповідно. Потужність ступеня для режимів № 1 і 2 становить 8,6 і 3,4 МВт відповідно.

#### Модернізована проточна частина

Для проектування осьових лопаток турбін в роботі використовується розроблена в ІПМаш НАН України комплексна методологія, яка включає методи різних рівнів складності – від одновимірних до моделей розрахунку просторових в'язких течій, а також аналітичних методів опису просторових геометрій проточних частин на основі обмеженої кількості параметризованих величин [7]. Комплексна методологія проектування реалізована в програмному комплексі *IPMFlow*.

Спираючись як на досвід інших авторів, так і на свій власний [12, 17], спроектовано новий НА останнього ступеня зі складним коловим навалом лопатки біля кореневого обводу (рис. 5). Для створення модернізованої проточної частини знадобилося розглянути біля 20 варіантів лопаток НА.

Така форма лопатки забезпечила збільшення реактивності останнього ступеня перш за все біля кореневого обводу (рис. 6).

Зниження негативної реактивності привело до суттєвого зменшення відриву потоку на виході з проточної частини на режимі № 2 (рис. 7).

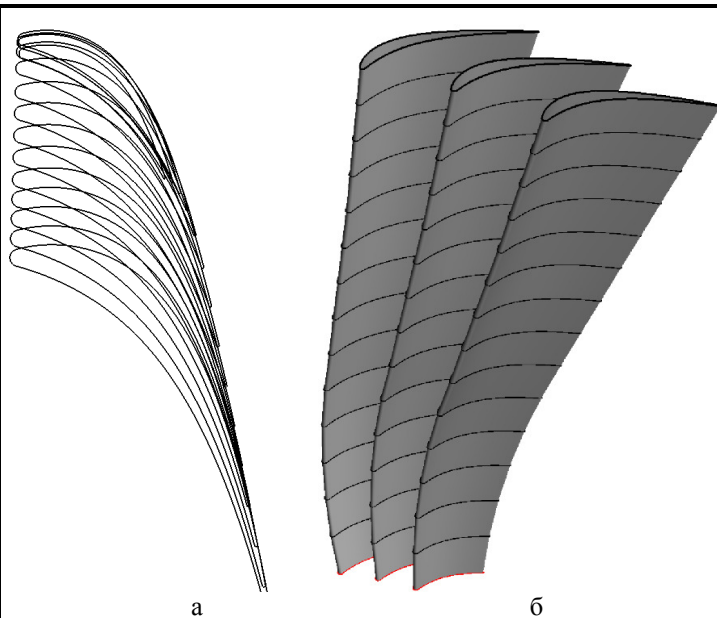
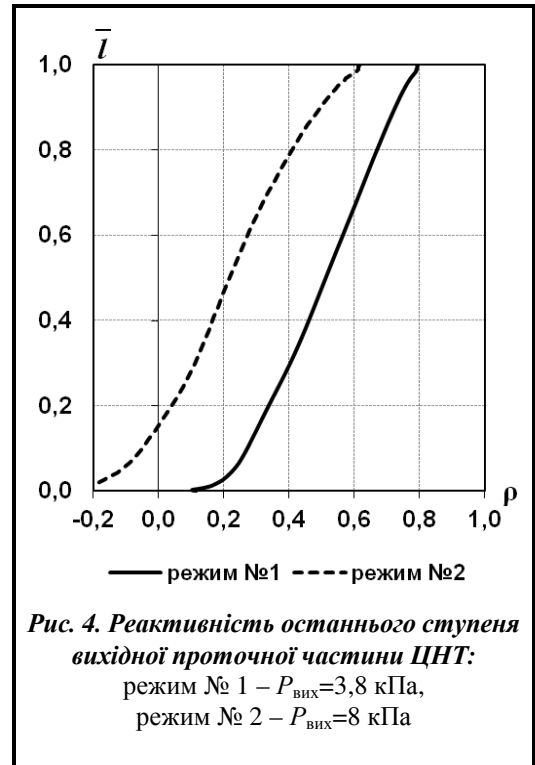


Рис. 5. Модифікована лопатка НА останнього ступеня:  
а – профілі; б – ізометрія

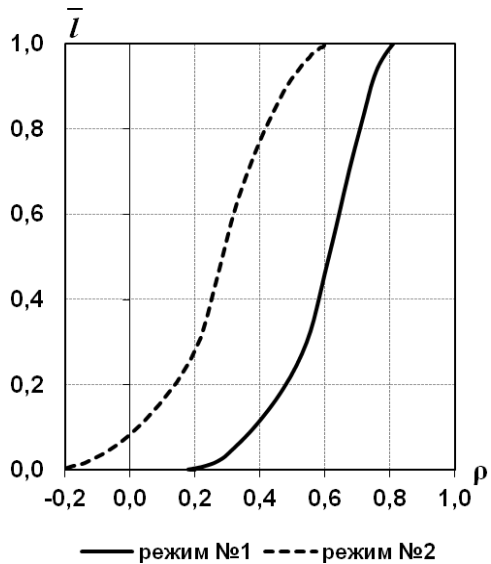
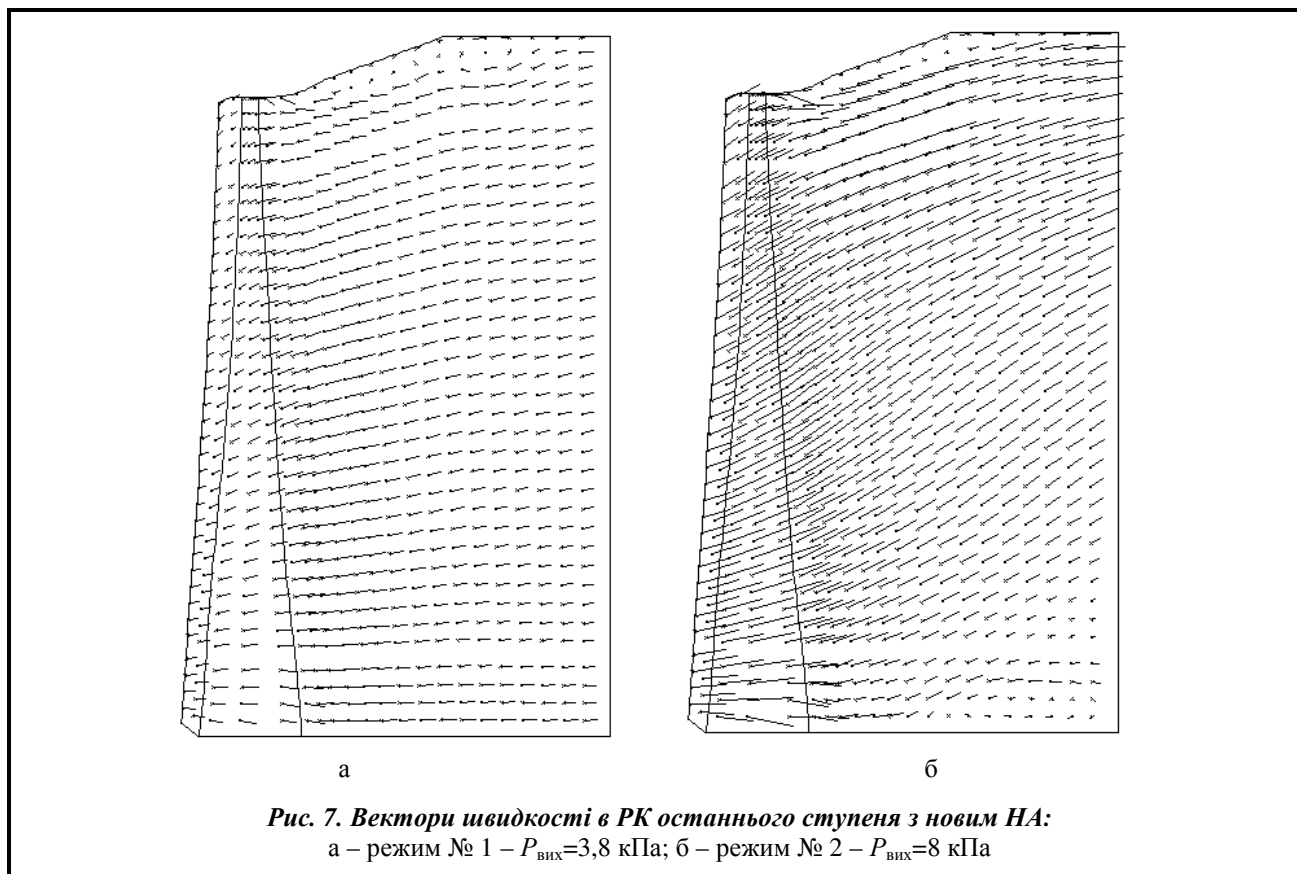


Рис. 6. Реактивність останнього ступеня вихідної  $i$  з новим НА останнього ступеня проточної частини ЦНТ:  
режим № 1 –  $P_{\text{вих}}=3,8$  кПа,  
режим № 2 –  $P_{\text{вих}}=8$  кПа



**Рис. 7. Вектори швидкості в РК останнього ступеня з новим НА:**  
 а – режим № 1 –  $P_{\text{вих}}=3,8$  кПа; б – режим № 2 –  $P_{\text{вих}}=8$  кПа

В таблиці наведено інтегральні характеристики вихідного і модернізованого останніх ступенів для двох режимів роботи.

#### Інтегральні характеристики

Режим №	Вихідна проточна частина			Модернізована проточна частина		
	ККД, %	ККД, % з втратами з вихідною швидкістю	$N$ , МВт (на три потіки)	ККД, %	ККД, % з втратами з вихідною швидкістю	$N$ , МВт (на три потіки)
1	88,8	78,8	25,83	89,0	79,7	26,44
2	81,2	59,9	10,36	87,0	71,4	12,34

З наведених у таблиці результатів видно, що на режимі № 1 у модернізованій проточній частині приріст ККД склав 0,9 %, а потужності – 0,61 МВт. Вагоміший результат досягнуто на режимі № 2, за ККД – 11,5 %, а за потужністю – майже 2 МВт. Наведені сумарні значення потужності для трьох потоків ЦНТ.

#### Висновки

З використанням сучасних методів розрахунку в'язких тривимірних течій та проектування зроблено модернізовану проточну частину ЦНТ парової турбіни К–325–23,5. В модернізованій проточній частині реалізовано нову лопатку НА останнього ступеня зі складним коловим навалом біля кореневого меридіонального обводу.

Виконана модернізація відповідає основній меті роботи, а саме, підвищенню ефективності останнього ступеня на режимах зі збільшеним тиском у конденсаторі (режим «поганого» вакууму) з забезпеченням «незмінення» вихідного рівня ефективності на номінальному режимі роботи. Так, на номінальному режимі роботи (режим № 1) приріст ККД склав 0,9 %, потужності – 0,61 МВт, а на режимі з підвищеним тиском у конденсаторі (режим № 2) досягнуто значно більшого приросту показників – 11,5 % і майже 2 МВт за ККД й потужністю відповідно.

## Література

- Petinrin J. O., Shaaban M. Overcoming challenges of renewable energy on future smart grid. *Telkomnika*. 2012. Vol. 10. No. 2. P. 229–234. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v10i2.781>.
- Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. 66 с.
- Щегляев А. В. Паровые турбины. Теория теплового процесса и конструкции турбин. М.: Энергоатомиздат, 1993. 416 с.
- Denton J. D. Learning flow physics from turbomachinery flow calculations / Ed. Dvorak R. and Kvapilova J. *Proc. of the Int. Symp. on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows*. Prague, SCMP Publication. 1993. P. 23–51.
- Программа ANSYS-Fluent для CFD моделирования турбомашин. ANSYS: official site, 2018. URL: <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>.
- Программа NUMECA – Tubomachinerysolution для CFD моделирования и оптимизации турбомашин. NUMECA international: official site, 2020. URL: [http://www.numeca.com/en\\_eu/turbomachinery](http://www.numeca.com/en_eu/turbomachinery).
- Rusanov A., Rusanov R., Lampart P. Designing and updating the flow part of axial and radial-axial turbines through mathematical modeling. *Open Eng. (formerly Central European J. Eng.)*. 2015. Vol. 5. Iss. 1. P. 399–410. <https://doi.org/10.1515/eng2015-0047>.
- Янгъзов А., Лазаровски Н. Влияние геометрической формы соплового аппарата на эффективность преобразования энергии в ступенях паровых турбин. *Ansys Advantage. Русская редакция. Инж.-техн. журн.* 2009. № 11. С. 29–34.
- D’Ippolito G., Dossena V., Mora A. The influence of blade lean on straight and annular turbine cascade flow field. *ASME J. Turbomachinery*. 2011. Vol. 133 (1). No. 011013 (9 p.). <https://doi.org/10.1115/1.4000536>.
- Русанов А. В., Ершов С. В. Математическое моделирование нестационарных газодинамических процессов в проточных частях турбомашин: монография. Харьков: ИПМаш НАН Украины, 2008. 275 с.
- Rusanov A., Shubenko A., Senetskyi O., Babenko O., Rusanov R. Heating modes and design optimization of cogeneration steam turbines of powerful units of combined heat and power plant. *Energetika*. 2019. Vol. 65. No. 1. P. 39–50. <https://doi.org/10.6001/energetika.v65i1.3974>.
- Lampart P., Yershov S. Direct constrained computational fluid dynamics based optimization of three-dimensional blading for the exit stage of a large power steam turbine. *Transactions of ASME. J. Eng. for Gas Turbines and Power*. 2003. Vol. 125. No. 1. P. 385–390. <https://doi.org/10.1115/1.1520157>.
- IAPWS-95. Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use. IAPWS-95: official site, 2019. URL: <http://www.iapws.org>.
- Rusanow A. V., Lampart P., Pashchenko N. V., Rusanov R. A. Modelling 3D steam turbine flow using thermodynamic properties of steam IAPWS-95. *Polish Maritime Research*. 2016. Vol. 23. No. 1. P. 61–67. <https://doi.org/10.1515/pomr-2016-0009>.
- Yershov S., Rusanov A., Gardzilewicz A., Lampart P. Calculations of 3D viscous compressible turbomachinery flows. *Proc. 2nd Symp. on Comp. Technologies for Fluid/Thermal/Chemical Systems with Industrial Applications, ASME PVP Division Conf.*, 1–5 August 1999, Boston, USA, PVP. 1999. Vol. 397 (2). P. 143–154.
- Menter F. R. Two-equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J.* 1994. Vol. 32. No. 8. P. 1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>.
- Русанов А. В., Пашенко Н. В. Аэродинамическое совершенствование цилиндра низкого паровой турбины мощностью 200 МВт. *Пробл. машиностроения*. 2009. Т. 12. № 2. С. 7–15.

Надійшла до редакції 24.02.2020

### Повышение эффективности последней ступени цилиндра низкого давления паровой турбины за счет пространственного профилирования лопаток

<sup>1</sup> А. В. Русанов, <sup>2</sup> В. Л. Швецов, <sup>1,3</sup> С. В. Алехина, <sup>1</sup> Н. В. Пашенко, <sup>1</sup> Р. А. Русанов,  
<sup>2</sup> М. Г. Ищенко, <sup>2</sup> Л. А. Сластен, <sup>2</sup> Р. Б. Шерфединов

<sup>1</sup> Інститут проблем машиностроення ім. А. Н. Подгорного НАН України,  
61046, Україна, г. Харків, ул. Пожарського, 2/10

<sup>2</sup> Акціонерне товариство «Турбоатом»,  
61037, Україна, г. Харків, пр. Московський, 199

<sup>3</sup> Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,  
61000, Украина, г. Харьков, площадь Свободы, 4

*В работе представлен вариант усовершенствования проточной части цилиндра низкого давления (ЦНД) паровой конденсационной турбины К-325-23,5 (серия К-300) за счет модернизации последней ступени. Турбина К-325-23,5 разработана для замены устаревших турбин серии К-300, которые вместе с турбинами серии К-200 составляют основу тепловой энергетики Украины. В модернизированной проточной части применены новые лопатки направляющего аппарата последней ступени со сложным окружным навалом у корня. Целью модернизации было повышение эффективности ЦНД на режимах «плохого» вакуума в конденсаторе с обеспечением «неснижения» его эффективности на номинальных режимах работы. Усовершенствованная проточная часть ЦНД разработана с использованием современных методов расчета вязкого трехмерного течения, основанных на численном интегрировании осредненных уравнений Навье-Стокса. Для турбулентных эффектов используется двухпараметрическая модель турбулентности SST Ментера, а для учета реальных свойств рабочего тела – уравнение состояния IAPWS-95. Для построения трехмерной геометрии осевых лопаток применен оригинальный метод, исходными данными для которого было ограниченное количество параметризованных величин. Использованные методы газодинамических расчетов и проектирования проточных турбомашин реализованы в программном комплексе **IPMFlow**, который является развитием программных комплексов **FlowER** и **FlowER-U**. Исследуемую проточную часть ЦНД ограничено двумя последними ступенями (4-й и 5-й). Для построения расчетной области использована разностная сетка с общим количеством элементарных объемов более 3 млн. В процессе исследования рассмотрено свыше 20 вариантов лопаток направляющего аппарата последней ступени. В модернизированной проточной части последней ступени ЦНД на номинальном режиме работы прирост коэффициента полезного действия (КПД) составил 0,9% и мощности – 0,61 МВт. На режиме с «плохим» вакуумом (с повышенным давлением) в конденсаторе достигнуто значительный прирост: КПД – на 11,5%, мощность выросла почти на 2 МВт.*

**Ключевые слова:** пространственное профилирование, численное моделирование, пространственное течение, газодинамическая эффективность, паровая турбина, последняя ступень.