

Ю. О. ЮДІН, І. І. МАЛИМОН

## РОЗРАХУНКОВЕ АЕРОДИНАМІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИХІДНОЇ ЧАСТИНИ ПОТУЖНОЇ ПАРОВОЇ ТУРБИНИ В ШИРОКОМУ ДІАПАЗОНІ РЕЖИМІВ РОБОТИ

Проведено серію розрахункових досліджень аеродинамічних характеристик моделі останнього ступеня ЦНТ парової турбіни з вихідним патрубком. Дослідження виконано в широкому діапазоні режимів роботи останнього ступеня  $GV_2$ . Модель ступеня побудовано за допомогою програмного комплексу *AxSTREAM* і розраховано в програмному комплексі *3D Solver*. Модель патрубка виконано віссиметричною. Розподіл параметрів для розрахунків взято з експериментальних даних, отриманих на ПД ГРЕС за участі кафедри турбінобудування НТУ «ХПІ». Результати розрахунку задовільно верифіковано з експериментом. Отриману розрахункову модель можливо використовувати при подальших розрахункових дослідженнях з метою пошуку шляхів оптимізації вихідних каналів турбомашин.

**Ключові слова:** вихідний патрубок, останній ступінь, турбіна, верифікація, віссиметрична модель.

Yu. YUDIN, I. MALYMON

## NUMERICAL AERODYNAMIC INVESTIGATION OF AN OUTLET PART FOR POWERFUL STEAM TURBINE IN A WIDE OPERATING MODES RANGE

A series of computational studies of the aerodynamic characteristics for the model of a steam turbine LPC last stage with an exhaust hood has been performed. The studies were carried out in a wide range of operating modes of the last stage  $GV_2$ . The stage model was built using *AxSTREAM* software package and calculated in *3D Solver* software package. The exhaust hood model was axisymmetric and diffuserless. The distribution of parameters for calculations was taken from the experimental data, which were obtained at PD GRES (Pridneprovskaya thermal power station) with the participation of the Department of Turbine Engineering of NTU "KHPI". The results of calculations were satisfactorily verified with experimental data at all operating modes investigated. The resulting flow data can be used to evaluate the aerodynamics of outlet turbine parts when designing exhaust hoods. The obtained calculation model can be applied in further calculation studies to find ways to optimise the output channels of turbomachines.

**Keywords:** exhaust hood, last stage, turbine, verification, axisymmetric model.

## Вступ

На сьогоднішній день підвищення ефективності та економічності турбомашин є актуальною проблемою. При проектуванні та модернізації турбоустановок основна увага приділяється підвищенню ККД. Вихідні канали є важливими елементами проточних частин турбомашин і мають значний вплив на загальну продуктивність установки [1] – [3]. Підвищення ефективності роботи турбоустановок можна досягти шляхом аеродинамічного удосконалення вихідних патрубків [4], [5]. Проведення експерименту з метою дослідження й оптимізації вихідних каналів дозволяє отримати достовірну інформацію про аеродинамічну ефективність патрубків, але має високу вартість. Тому для визначення параметрів потоку виконуються розрахункові моделювання вихідних патрубків за допомогою різних *CFD*-програм [6] – [9], при використанні яких необхідно проводити верифікацію розрахункових даних з експериментальними дослідженнями.

Характер течії у вихідних каналах значно впливає на економічність та надійність роботи останніх ступенів парових турбін, особливо на нерозрахункових режимах роботи. Вихідні патрубки мають бути спроектовані таким чином, щоб

забезпечувати високу ефективність як ступеня, так і турбіни в широкому діапазоні режимів роботи.

У статті наведено результати порівняння даних розрахункових досліджень моделі останнього ступеня ЦНТ парової турбіни типу К-1000 сумісно з вихідним патрубком турбіни ВКТ-100 з експериментальними даними, що отримані на ПД ГРЕС за участю кафедри турбінобудування НТУ «ХПІ», на трьох режимах роботи  $\overline{GV}_2 = 0,41; 0,57; 0,72$ .

## Мета роботи

З метою отримання розрахункової моделі, яка дозволить задовільно відображати картину течії в вихідних частинах турбомашин на різних режимах роботи  $\overline{GV}_2$ , проведено серію розрахункових досліджень останнього ступеня турбіни разом з вихідним патрубком.

На основі експериментальних даних побудовано комп'ютерну модель останнього ступеня ЦНТ парової турбіни типу К-1000 в масштабі 1:2, як було в експериментах. Ступінь складався з соплової та робочої решіток. Модель побудовано в програмному комплексі *AxSTREAM* на основі даних із креслень, а також із врахуванням геометричних даних (металічні кути), взятих з експерименту (рис. 1).

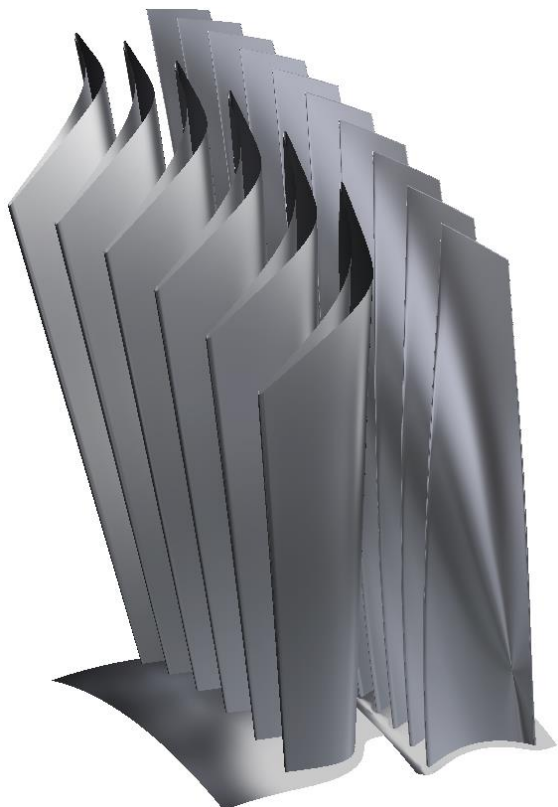


Рис. 1 – Модель ступеню

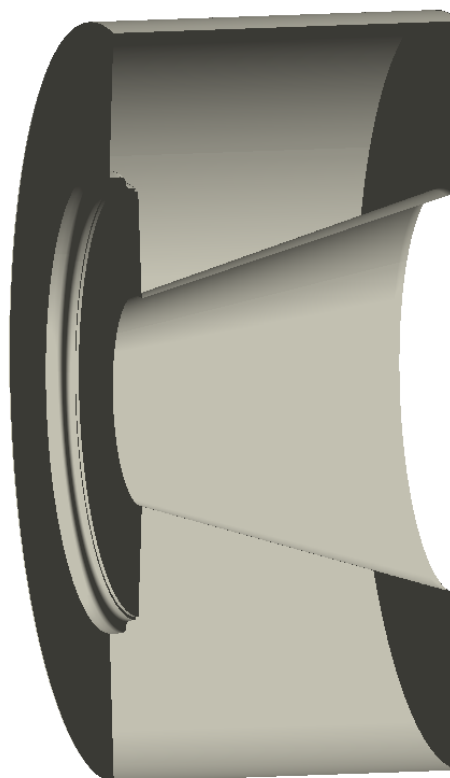


Рис. 2 – Модель вихідного патрубку

Також в програмах для 3D моделювання побудовано вісесиметричну комп'ютерну модель бездифузорного вихідного патрубку турбіни ВКТ-100, що розташована безпосередньо за останнім ступенем (рис. 2), як було в експериментах. В даній моделі патрубка дальня торцева стінка віддалена від робочої лопатки приблизно на 2,8 висоти лопатки. В експерименті зонди були розташовані на вході в ступінь, в міжвінцевому зазорі та після робочої лопатки, а розрахункові дослідження, що виконано в програмному комплексі *3D Solver*, дозволили отримати параметри і характер течії також і у вихідній частині (останній ступінь з патрубком).

В моделях турбінного ступеню й вихідного патрубку побудовано сітку прямокутного типу задовільної якості зі зменшеною кількістю елементів. При цьому були проведені розрахунки і на сітці з більшою кількістю елементів, однак визначено, що зміна налаштувань точності сітки незначно впливають на результати. Тому обрано сітку з меншою кількістю елементів із умови зменшення витраченого часу на розрахунки моделей.

В пограничному шарі лопаток застосовано згущення елементів сітки. В розрахунках встановлено модель турбулентності *SST* [10], яка є рекомендованою при розрахунках турбомашин.

Розрахунки відсіку «ступінь + ВП» виконувалися за два етапи. Спершу, перед дослідженням вихідної частини було виконано розрахунки тільки

останнього ступеня турбіни із заданим розподілом параметрів на вході і виході, що було взято із експерименту, з метою отримання стійкої розрахункової моделі, а також для визначення витрати робочого тіла. Після цього проведено дослідження вихідної частини «ступінь + вихідний патрубок», в якому на вході в ступінь було задано розподіл параметрів повного тиску і температури за 12 перерізами, що було взято з експериментальних даних. На виході з вихідного патрубку задано значення параметру витрати. Розрахункові дослідження моделей виконано на трьох режимах роботи останнього ступеня з відносною об'ємною витратою робочого тіла  $\overline{GV}_2 = 0,41; 0,57; 0,72$ , як і при виконанні експериментальних досліджень моделі останнього ступеня турбіни разом з вихідним патрубком.

### Результати розрахунків

Результати розрахунку моделі відсіку «ступінь + ВП» порівнювалися з даними експерименту в перерізах перед ступенем і в міжвінцевому зазорі, а також після ступеня на вході у вихідний патрубок. Порівняння відбувалося за розподілом вздовж радіуса таких параметрів, як статичний тиск  $P$ , повний тиск  $P^*$ , повна температура  $T^*$ , абсолютні та відносні кути потоку на вході та виході з лопаток  $\alpha$  і  $\beta$ , кут скошу потоку в меридіональній

площині  $\gamma$ , абсолютна осьова швидкість виходу потоку з робочих лопаток  $C_{2z}$ .

На рис. 3 представлено для прикладу графічне зображення течії в проточній частині турбіни на режимі роботи останнього ступеня  $\overline{GV}_2 = 0,41$  в експериментальних і розрахункових дослідженнях.

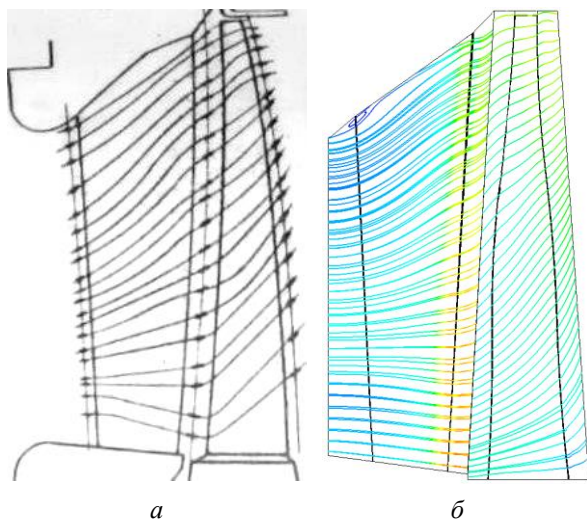


Рис. 3 – Лінії току в проточній частині турбіни на режимі роботи  $\overline{GV}_2 = 0,41$ :  
а – експеримент; б – розрахунок

На вході до соплового апарату течія розподілена дещо нерівномірно, кут скосу ліній току  $\gamma$  поступово збільшується з мінус  $5^\circ$  до  $20^\circ$ . З розширенням периферійної частини соплового апарату лінії току переважно підіймаються вздовж каналу, а поблизу кореневого обводу частина течії підтискується до нього. Нахилення ліній току в міжвінцевому каналі складає від  $\gamma =$  мінус  $10^\circ$  до  $50^\circ$ . В проточній частині робочих лопаток в нижній половині має місце різке підняття ліній току. На виході зі ступеня кут скосу потоку  $\gamma$  переважно складає  $60^\circ - 70^\circ$ , поступово знижуючись до  $10^\circ - 20^\circ$  при наближенні до периферії каналу. На рис. 4 показано порівняння експериментальних та розрахункових значень кута скосу потоку  $\gamma$  по відносній довжині перерізу  $l'$ . Дані взято на вході, в міжвінцевому зазорі та виході зі ступеня.

На рис. 5 представлено порівняння параметрів розрахунку та експерименту в перерізі після ступеню по відносній довжині перерізу  $l'$  на режимі роботи останнього ступеня турбіни  $\overline{GV}_2 = 0,41$ . Загалом, дані розрахунку задовільно співпадають з даними експерименту. Різниця в розподілі параметрів статичного тиску  $P_2$  і повної температури  $T_2^*$  незначна і складає до 2 %. При порівнянні розподілу кута потоку на виході з робочої лопатки  $\alpha_2$  різниця більш помітна. На відносній довжині перерізу  $l' = 0,5$  розбіжність між розрахунко-

вими й експериментальними даними досягає 8 %. Різниця в результатах головним чином обумовлена нестійкістю розрахунків на нерозрахункових режимах роботи турбіни. Відомо, що розрахункові комплекси можуть розраховувати глибокі нерозрахункові режими з деякою похибкою через значну нестійкість потоку, відривні течії та розвинені циркуляційні зони. Така похибка спостерігається лише при розрахунках на режимі роботи останнього ступеня турбіни  $\overline{GV}_2 = 0,41$ .

На рис. 6 зображено лінії току в проточній частині турбінного ступеня і вихідного патрубку на трьох режимах роботи  $\overline{GV}_2 = 0,41; 0,57; 0,72$ . При  $\overline{GV}_2 = 0,41$  течія в ступені піднімається до периферійного обводу, нерівномірно розподіляючись на виході з робочої лопатки, далі щільним потоком різко спрямовується до виходу з патрубка, циркуляційні зони найбільш розвинені на цьому режимі. На режимі  $\overline{GV}_2 = 0,57$  течія в ступені розподіляється більш рівномірно, але на виході з робочої лопатки дещо згущується біля периферії. В патрубку течія займає менше половини каналу, а біля виходу повертає в сторону обичайки. При  $\overline{GV}_2 = 0,72$  перед сопловою лопаткою біля кореневого обводу спостерігається невелика вихрова зона. Однак далі в ступені і на вході в патрубок течія здебільшого розподіляється рівномірно. В патрубку активна течія займає більшу частину каналу, але на периферії і у кореня формуються вихрові зони, які погіршують поле швидкостей. Це в більшій мірі пов'язано з великою відстанню від робочої лопатки останнього ступеня дальньої торцевої стінки бездифузрного патрубка ВКТ-100, що в приблизно 2 рази більше ніж у патрубка типу К-1000.

## Висновки

Проведено серію розрахункових досліджень моделі останнього ступеня ЦНТ парової турбіни типу К-1000 з вихідним патрубком ВКТ-100 на трьох режимах роботи  $\overline{GV}_2 = 0,41; 0,57; 0,72$ . Результати досліджень порівняно з даними експерименту. Визначено, що дана розрахункова модель дозволяє задовільно відображати розподіл параметрів в вихідній частині парової турбіни на різних режимах роботи  $\overline{GV}_2$ . Отримані дані по течії у вихідному патрубку дозволять при проектуванні вихідних патрубків оцінювати їх об'єм з точки зору аеродинаміки.

Отримана розрахункова модель може бути використана при подальших розрахункових дослідженнях вихідних каналів з метою пошуку шляхів оптимізації вихідних частин турбомашин.

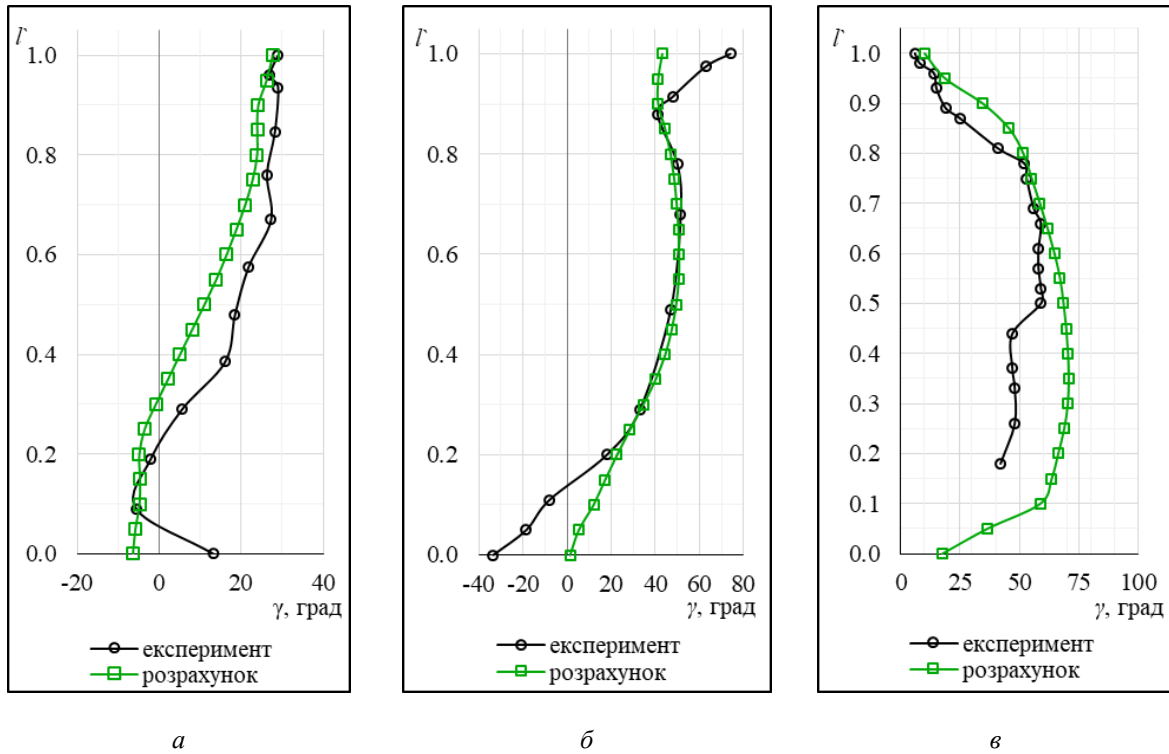


Рис. 4 – Порівняння значень кута скосу потоку  $\gamma$  в експерименті та розрахунку (режим  $\overline{GV}_2 = 0,41$ ):  
 а – на вході в ступінь; б – в міжвінцевому зазорі; в – на виході зі ступеня

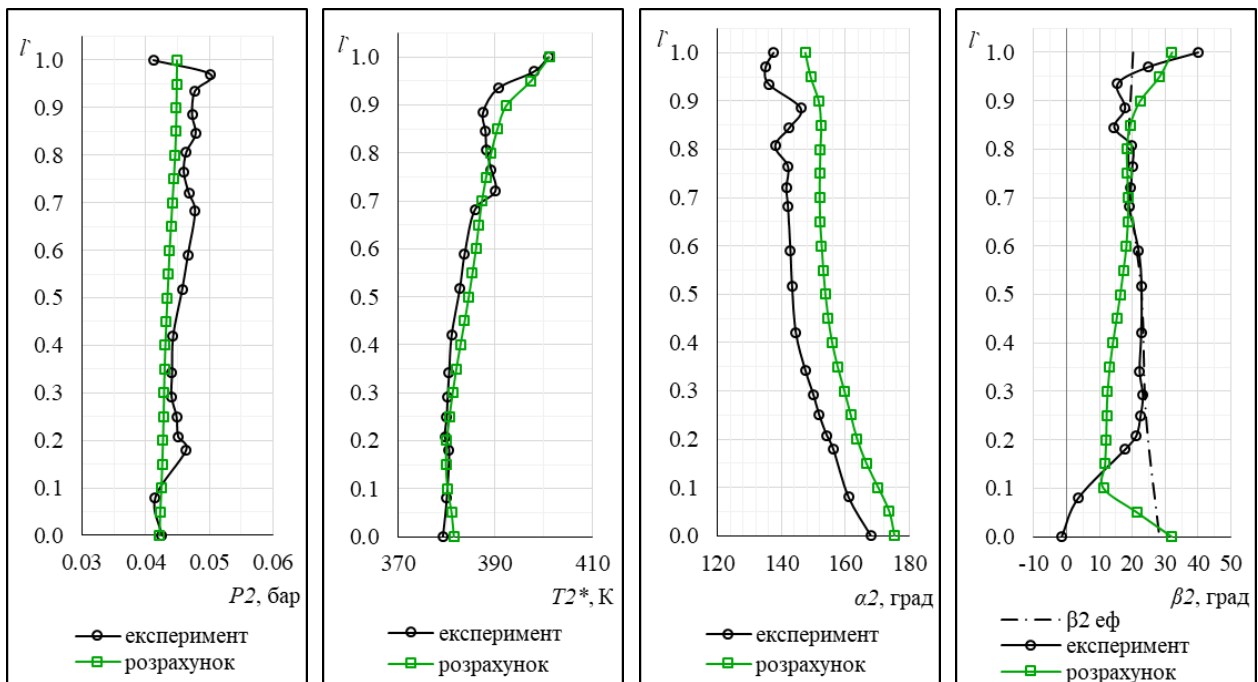


Рис. 5 – Порівняння результатів експериментальних і розрахункових досліджень на прикладі параметрів на виході зі ступеня (режим  $\overline{GV}_2 = 0,41$ )

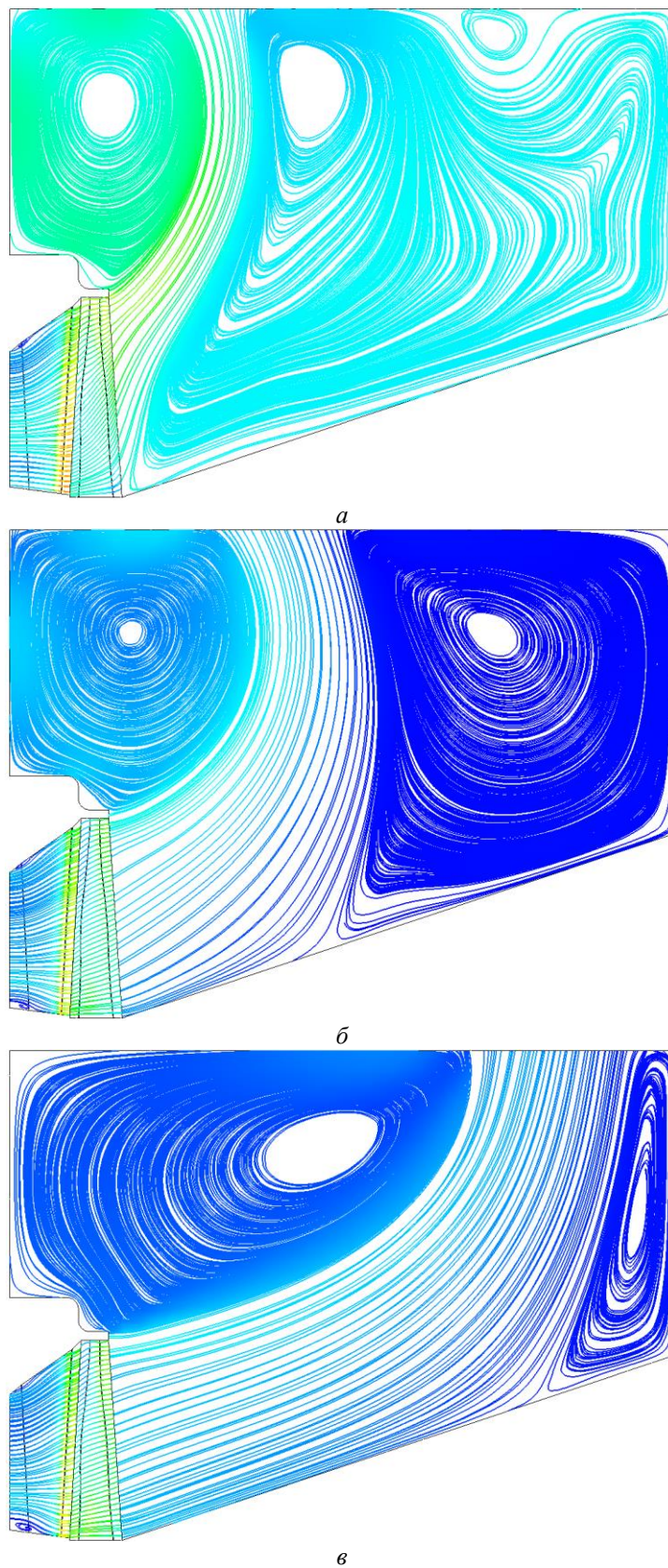


Рис. 6 – Лінії току у вихідній частині на трьох режимах роботи останнього ступеня:  
 $a - \overline{GV}_2 = 0,41$ ;  $б - \overline{GV}_2 = 0,57$ ;  $в - \overline{GV}_2 = 0,72$

## Список літератури

## References (transliterated)

1. Дейч М. Е. Газодинамика диффузоров и выхлопного патрубка турбомашин / М. Е. Дейч, А. Е. Зарянкин. – 1970. – 273 с.
2. Мигай В. К. Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин / В. К. Мигай, Э. И. Гудков. – 1981. – 272 с.
3. Субботович, В. П. Влияние неосесимметричного вдува потока в диффузоре на работу выхлопного патрубка ЦНД турбины / В. П. Субботович, Ю. А. Юдин, А. В. Лапузин, А. Ю. Юдин, В. Л. Швецов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С. 24–28. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.03.
4. Fu, J.-L. Unsteady interactions between axial turbine and nonaxisymmetric exhaust hood under different operational conditions / J.-L. Fu, J.-J. Liu, S.-J. Zhou // Journal of Turbomachinery. Transactions of the ASME. – 2012. – No. 134(4): 041002. – 11 p. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4003647>.
5. Малимон І. І. Розрахункове аеродинамічне дослідження вихлопного дифузора потужної парової турбіни в широкому діапазоні режимів роботи / І. І. Малимон, Ю. О. Юдін, В. П. Субботович, О. В. Лапузин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2020. – № 1(3). – С. 5–9. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2020.01.01>.
6. Burton, Z. A generic low pressure exhaust diffuser for steam turbine research / Z. Burton, S. Hogg, G. Ingram, // ASME: Oil and Gas Applications; Concentrating Solar Power Plants; Steam Turbines; Wind Energy – 2012. – No. 6. – P. 455–466. – DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2012-68485>.
7. Gardzilewicz, A. Methodology of CFD Computations Applied for Analysing Flow through Steam Turbine Exhaust Hoods / A. Gardzilewicz, J. Swirydczuk, J. Badur, M. Karcz, R. Werner, C. Szyrejko // Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery. – 2003. – No. 113. – P. 157–168.
8. Liu, J. The Investigation of Turbine and Exhaust Interactions in Asymmetric Flows: Part 2 - Turbine-Diffuser-Collector Interactions // J. Liu, T. P. Hynes // The American Society of Mechanical Engineers (ASME). Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. – 2009. – No. GT-2002-30343. – P. 179–188. – DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2002-30343>.
9. Швецов В. Л. Исследование аэродинамических и энергетических характеристик выхлопного отсека ЦНД «ступень-диффузор» / В. Л. Швецов, И. И. Кожешкурт, В. А. Конев, В. Г. Солодов, А. А. Хандримайлов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2014. – № 12(1055). – С. 12–20. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X (print).
10. Fondelli T. Investigation on Low-Pressure Steam Turbine Exhaust Hood Modelling through Computational Fluid Dynamic Simulations / T. Fondelli, T. Diurno, L. Palanti, A. Andreini, B. Facchini, L. Netti, L. Arcangeli, N. Maceli // AIP Conference Proceedings. – 2019. – No. 2191(1): 020076. – P. 1–10. – DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5138809>.
1. Deich, M. E. and Zaryankin A. E. (1970), *Gazodinamika diffuzorov i vyhlopnih patrubkov turbomashin* [Diffusers and exhaust chamber turbomachinery gas dynamics].
2. Migay, V. K. and Gudkov, E. I. (1981), *Proektirovanie i raschet vyihodnyih diffuzorov turbomashin* [Design and calculation of output diffusers of turbomachines].
3. Subotovich, V., Yudin, Yu., Lapuzin, A., Yudin, A. and Shvetsov, V. (2017), “Influence of nonaxisymmetric flow injection into the diffuser on the turbine LPC exhaust nozzle”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 9(1231), pp. 24–28, ISSN 2078-774X, <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2017.09.03>.
4. Fu, J.-L., Liu, J.-J., and Zhou, S.-J. (2012), “Unsteady interactions between axial turbine and nonaxisymmetric exhaust hood under different operational conditions”, *Journal of Turbomachinery. Transactions of the ASME*, no. 134(4): 041002, 11 p., <https://doi.org/10.1115/1.4003647>.
5. Malymon, I., Yudin, Yu., Subotovich, V. and Lapuzin, A. (2020), “Numerical aerodynamic investigation of exhaust diffuser for powerful steam turbine in a wide operating modes range”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 1(3), pp. 5–9, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2020.01.01>.
6. Burton, Z., Hogg, S. and Ingram, G. (2012), “A generic low pressure exhaust diffuser for steam turbine research”, *ASME: Oil and Gas Applications; Concentrating Solar Power Plants; Steam Turbines; Wind Energy*, no. 6, pp. 455–466, <https://doi.org/10.1115/GT2012-68485>.
7. Gardzilewicz, A. Swirydczuk, J., Badur, J., Karcz, M., Werner, R., Szyrejko, C. (2003), “Methodology of CFD computations applied for analysing flow through steam turbine exhaust hoods”, *Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery*, no. 113, pp. 157–168.
8. Liu, J. and Hynes, T. P. (2009), “The Investigation of Turbine and Exhaust Interactions in Asymmetric Flows: Part 2 - Turbine-Diffuser-Collector Interactions”, *The American Society of Mechanical Engineers (ASME). Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, no. GT-2002-30343, pp. 179–188, <https://doi.org/10.1115/GT2002-30343>.
9. Shvetsov V. L., Kozheshkurt I. I., Konev V. A., Solodov V. G., Khandrimailov A. A. (2014), “Issledovanie ajerodinamicheskikh i jenergeticheskikh harakteristik vyhlopnogo otseka CND “stupen'-diffuzor” [Investigation of Aerodynamic and Power Characteristics of the Exhaust Compartment of the Low-Pressure Cylinder “Stage-Diffuser”]”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 12(1055), pp. 14–20, ISSN 2078-774X.
10. Fondelli T., Diurno T., Palanti L., Andreini A., Facchini B., Netti L., Arcangeli L., Maceli N. (2019), “Investigation on low-pressure steam turbine exhaust hood modelling through computational fluid dynamic simulations”, *AIP Conference Proceedings*, no. 2191(1): 020076, pp. 1–10, <https://doi.org/10.1063/1.5138809>.

Надійшла (received) 15.11.2023

## Відомості про авторів / About the Authors

**Юдін Юрій Олексійович (Yudin Yuriy)** – кандидат технічних наук, доцент; професор кафедри турбінобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: [yury55yudin@ukr.net](mailto:yury55yudin@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9770-2273>.

**Малимон Іван Іванович (Malymon Ivan)** – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: [sevcrimea13@gmail.com](mailto:sevcrimea13@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3162-4137>.