

Ю. О. ЮДИН, В. П. СУБОТОВИЧ, О. В. ЛАПУЗИН, І. І. МАЛИМОН

РОЗРАХУНКОВЕ АЕРОДИНАМІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИХЛОПНОГО ДИФУЗОРА ПОТУЖНОЇ ПАРОВОЇ ТУРБИНИ В ШИРОКОМУ ДІАПАЗОНІ РЕЖИМІВ РОБОТИ

Виконано розрахункове дослідження аеродинамічних характеристик чотирьох варіантів вихлопних вісерадіальних дифузорів турбіни К-325-23,5. Дослідження проведено в широкому діапазоні зміни відносної об'ємної витрати GV_2 останнього ступеня. При розрахунках використано імітаційну вісесиметричну модель дифузора, яку верифіковано з експериментальними даними. В кожному варіанті змінювалася конструкція проточної частини вихідного патрубку зі встановленими або видаленими торовим і широко-режимним дефлекторами. Розрахунки виконані в програмному комплексі *ANSYS-Fluent*. За результатами дослідження можна рекомендувати модернізацію вихідного дифузора турбіни шляхом встановлення широкорежимного дефлектору в початковий варіант.

Ключові слова: вісерадіальний дифузор, турбіна, дефлектор, коефіцієнт повних втрат, вісесиметрична модель.

Ю. А. ЮДИН, В. П. СУБОТОВИЧ, А. В. ЛАПУЗИН, И. И. МАЛИМОН

РАСЧЕТНОЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХЛОПНОГО ДИФФУЗОРА МОЩНОЙ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Выполнено расчетное исследование аэродинамических характеристик четырех вариантов выхлопных осерадиальных диффузоров турбины К-325-23,5. Исследование проведено в широком диапазоне изменения относительного объемного расхода GV_2 последней ступени. При расчетах использована имитационная осесимметричная модель диффузора, которая верифицирована с экспериментальными данными. В каждом варианте изменялась конструкция проточной части выходного патрубка с установленными или удаленными торовым и широкорежимным дефлекторами. Расчеты выполнены в программном комплексе *ANSYS-Fluent*. По результатам исследования можно рекомендовать модернизацию выходного диффузора турбины путем установки широкорежимного дефлектора в исходный вариант.

Ключевые слова: осерадиальный диффузор, турбина, дефлектор, коэффициент полных потерь, осесимметричная модель.

YU. YUDIN, V. SUBOTOVICH, A. LAPUZIN, I. MALYMON

NUMERICAL AERODYNAMIC INVESTIGATION OF EXHAUST DIFFUSER FOR POWERFUL STEAM TURBINE IN A WIDE OPERATING MODES RANGE

The objectives of research done were to define the aerodynamic characteristics of the different axial-radial diffusers constructions on load-changing turbine operations with the purpose to find their aerodynamic improvement reserve. Using the CFD program, the numerical analysis of aerodynamic characteristics has been performed for the four options of outlet axial-radial diffusers used for the steam turbine K-325-23,5. The flow for all four options of the diffuser was calculated for preset constant total pressure and total temperature at the channel input and the static pressure at the diffuser output. The data was taken from experiment that had been performed by department of turbine construction of NTU "KhPI". A comparative analysis of the aerodynamic characteristics of the diffusers was performed and the values of the coefficients of total losses were defined. A version of the outlet axial-radial diffuser was suggested for the turbine that provides the lowest coefficient of total losses and better flow distribution through entire channel.

Key words: axial-radial diffuser, turbine, deflector, total loss factor, axisymmetric model.

Вступ

ККД турбомашин в основному визначається газодинамічною ефективністю їх проточних частин, важливими елементами яких є кільцеві перехідні і вихідні дифузори канали. Одним із шляхів підвищення економічних показників турбомашин є удосконалення аеродинаміки вихідних патрубків [1, 2]. Достовірну інформацію про аеродинамічну ефективність дифузори каналів можна отримати за допомогою фізичного експерименту. Для визначення параметрів потоку в каналах широко використовуються сучасні *CFD*-програми, при використанні яких в складних розрахункових моделях необхідно проводити верифікацію *CFD*-результатів за базами експериментальних даних.

Ефективність роботи відсіку «останній ступінь + вихідний патрубок» визначається як економічністю, так і надійністю роботи останнього ступеня. На режимах знижених навантажень особливо

гостро стає питання забезпечення надійності лопаткового апарата останнього ступеня, що залежить від характеру плин у вихідному патрубку. Відомі пропозиції [3–6], що спрямовані на зниження колової нерівномірності параметрів потоку, зменшення інтенсивності й розмірів циркуляційної зони, що виникає за робочим колесом ступеня в прикореневій зоні вихідного патрубка. При односторонньому вихлопі у конденсатор має місце деформація циркуляційної зони в окружному напрямку залежно від режиму роботи останнього ступеня. Такі відомості про течію у вихідних патрубках на режимах знижених навантажень дозволили впровадити конструкції вихідного патрубка, як із рухливими, так і зі стаціонарними елементами – дефлекторами [3–5], що дає можливість більш ефективно управляти потоком у вихідний патрубок у широкому діапазоні режимів.

У статті наведені результати розрахункових досліджень чотирьох варіантів вісерадіальних ві-

сесиметричних дифузорів (без збірної камери вихідного патрубка) для турбіни типу К-300: один варіант є початковим, а три інших варіанти відрізняються тільки наявністю або відсутністю дефлекторів у проточній частині дифузора.

Задачі дослідження

Основне завдання дослідження полягало в визначенні аеродинамічних характеристик вісерадіальних дифузорів різних конструкцій на змінних режимах з метою пошуку резервів їх аеродинамічного удосконалення.

Враховуючи відомості про роботу вихідних патрубків у широкому діапазоні навантажень [5], досліджено чотири моделі вісерадіальних дифузорів турбін типу К-300 (рис. 1): перший варіант – модель дифузора турбіни К-325-23,5 з тороподібним дефлектором, у другому варіанті встановлено широкорежимний дефлектор, в третьому варіанті моделі дифузора відсутні будь-які дефлектори, а в четвертому варіанті присутні тороподібний і широкорежимний дефлектори.

В моделях дифузорів побудовано прямокутну сітку з кількістю елементів близько 100 тис. Поблизу поверхонь стінки виконувалось згущення елементів сітки (рис. 2). Модель турбулентності у розрахунках вибрана $k-\epsilon$. Комп'ютерні моделі вихідних патрубків підготовлено та розраховано за допомогою програмного комплексу *ANSYS-Fluent*. Моделі дифузорів досліджено на трьох режимах роботи останнього ступеня з відносною об'ємною витратою робочого тіла $\overline{GV}_2 = 0,5; 0,75; 1$.

Для імітації розподілу параметрів за останнім ступенем в розрахункових вісесиметричних моделях дифузорів виконано розділення вхідного перерізу до бандажа на 10 ділянок. Також враховано наявність бандажа, радіального зазору (переріз 11) та, відповідно, перетікання робочого тіла крізь зазор. Для імітації надбандажної витоки тиск гальмування у перерізі 11 підвищували відносно тиску гальмування у перерізах 1–10, орієнтуючись на дані експерименту. Розподіл кутів потоку α_2 (кут в тангенціальному напрямі) і δ (кут скосу потоку у меридіональній площині) у перерізах 1–11 на відповідних режимах роботи \overline{GV}_2 також взято з експериментальних даних, які були отримані на кафедрі турбінобудування НТУ «ХП» при виконанні досліджень моделі останнього ступеня турбіни разом з дифузором вихідного патрубка на стенді повітряної турбіни.

Результати розрахунків

Порівняння дифузорів проводилося за коефіцієнтами повних втрат (КПВ), внутрішніх втрат і втрат

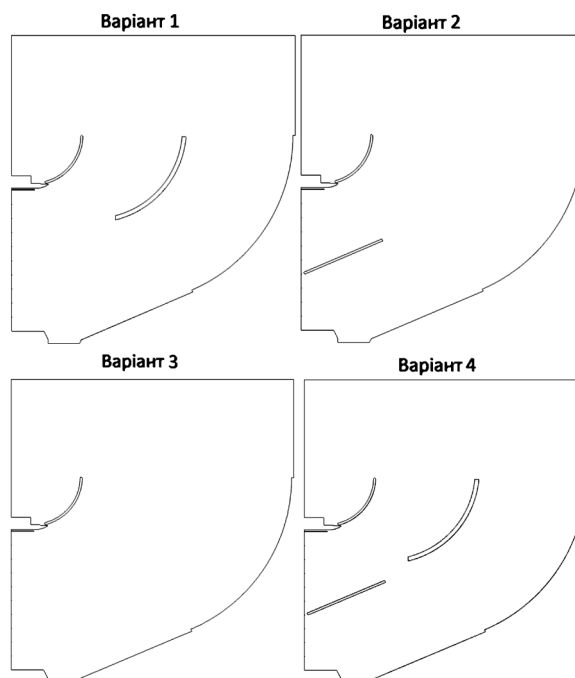


Рис. 1 – Моделі дифузорів

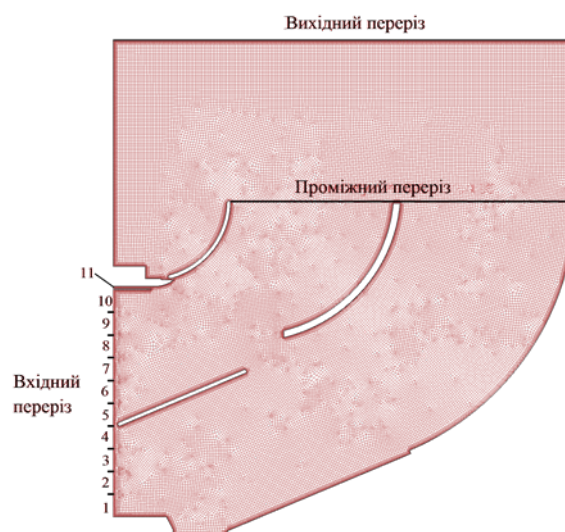


Рис. 2 – Будова сітки на прикладі вісерадіального дифузора варіанту 4

з вихідною швидкістю, які традиційно використовуються для оцінки ефективності дифузорів [1, 2, 6]. Для порівняння з даними експерименту виконано розрахунки варіантів 1, 2, 3 вісерадіальних дифузорів на змінних режимах роботи останнього ступеня.

На рис. 3 зображено для прикладу порівняння на режимі $\overline{GV}_2 = 0,5$. За результатами порівняння розрахункових та експериментальних даних визначено, що розрахункова модель задовільно відображає картину течії в дифузорі.

На режимі $\overline{GV}_2 = 0,5$ штатний кільцевий тороподібний дефлектор (перший варіант дифузора) практично не впливає на характеристики течії у порівнянні з варіантом дифузора без дефлекторів. В обох варіантах циркуляційна зона займає більше половини прохідних перерізів дифузора. Основна течія притискується до поверхні зовнішнього обводу дифузора і за рахунок зміни кривизни потоку має місцеве прискорення, де швидкості збільшуються в 1,5–1,7 рази стосовно швидкостей в інших зонах. Другий варіант дифузора дозволяє в 2,5 рази зменшити довжину циркуляційної зони і в 5 разів витрату робочого тіла, що циркулює в ній. Крім цього, за експериментальними даними, при наявності збірної камери вихлопного патрубку з одностороннім виходом потоку, така конструкція дозволяє зменшити колову нерівномірність тисків за робочим колесом останнього ступеня на маловитратних режимах і збільшити ККД у порівнянні з дифузором без дефлектора на режимі $\overline{GV}_2 = 0,5$ (різниця може досягати 10 %...15 %).

Розрахункову модель використано для розрахункового дослідження початкового і модернізованого варіантів вісерадіального дифузора турбіни К-325-23,5 у широкому діапазоні навантажень. За результатами розрахунків встановлено, що модернізація вихідного дифузора за рахунок встановлення ширококоримного дефлектора дозволяє знизити коефіцієнт повних втрат дифузора. На режимі $\overline{GV}_2 = 1$ дифузор з ширококоримним де-

флектором і тороподібною кільцевою лопаткою має близьке значення коефіцієнта повних втрат до початкового варіанта дифузора (~0,6). Невеликий зріст внутрішніх втрат компенсується додатковим дифузорним ефектом в зоні втулки. При зниженні відносної об'ємної витрати до $\overline{GV}_2 = 0,75$ кут скошу потоку у меридіональній площині вхідного перерізу дифузора збільшується і наближається до кута дефлектора у цій площині, тому на цьому режимі ширококоримний дефлектор також слабо впливає на течію і втрати в дифузорі. На режимах $\overline{GV}_2 = 0,75-0,5$ характер течії з ширококоримним дефлектором суттєво змінюється. Так на дослідженому режимі $\overline{GV}_2 = 0,5$ в початковому варіанті дифузора основна течія займає об'єм проточної частини дифузора між зовнішнім обводом і торовою кільцевою лопаткою, а в модернізованому варіанті ширококоримний дефлектор відхиляє основний потік у напрямку до втулки і, таким чином, зменшує розміри циркуляційної течії в зоні втулки. При цьому коефіцієнт повних втрат модернізованого варіанту зменшується з 1,06 до 0,73.

Отже, модернізація вихідного дифузора турбіни К-325-23,5 за рахунок встановлення ширококоримного дефлектора дозволяє не збільшувати КПВ на режимах $\overline{GV}_2 = 1-0,75$ і позитивно впливати на течію і коефіцієнт повних втрат дифузора в діапазоні режимів $\overline{GV}_2 = 0,75-0,5$.

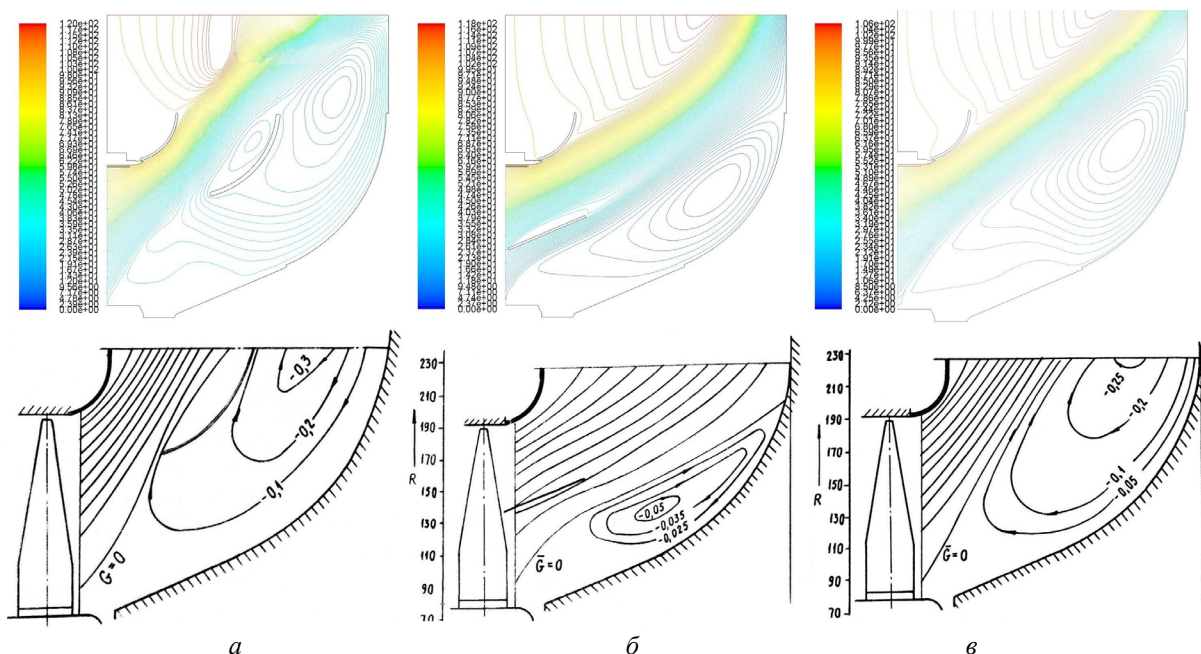


Рис. 3 – Порівняння розподілу розрахункових ліній рівних втрат експериментальними на режимі $\overline{GV}_2 = 0,5$ у дифузорах:

a – з торовим дефлектором; *б* – з ширококоримним дефлектором; *в* – без дефлекторів

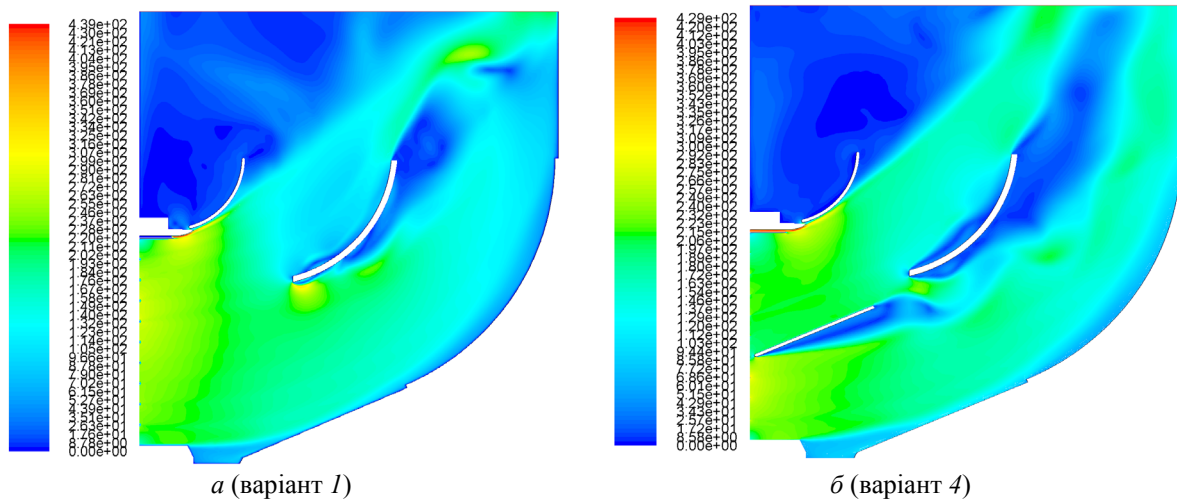


Рис. 4 – Розрахунковий розподіл швидкостей у дифузорах на режимі $\overline{GV}_2 = 1$

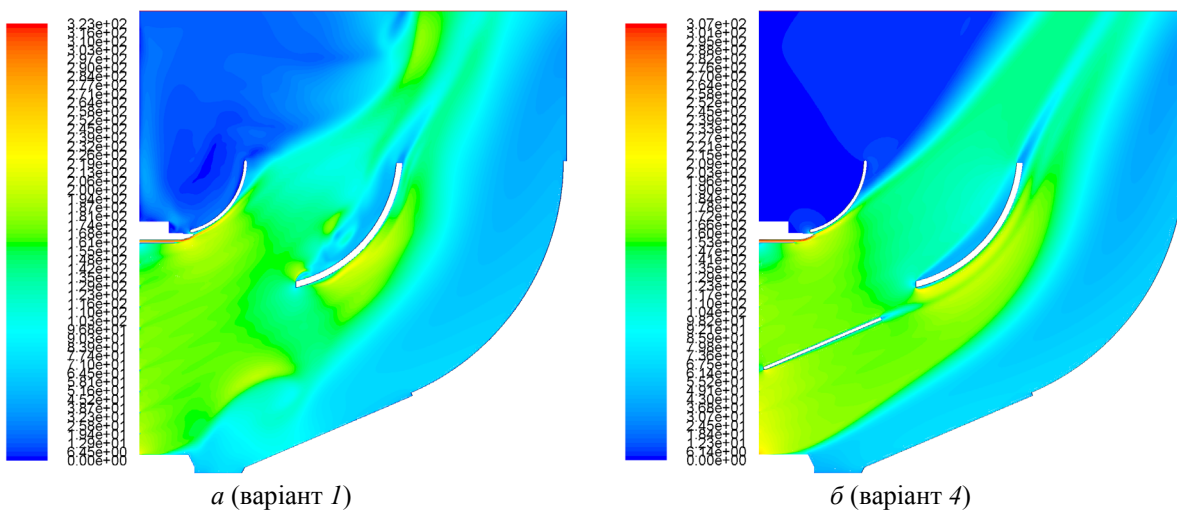


Рис. 5 – Розрахунковий розподіл швидкостей у дифузорах на режимі $\overline{GV}_2 = 0,75$

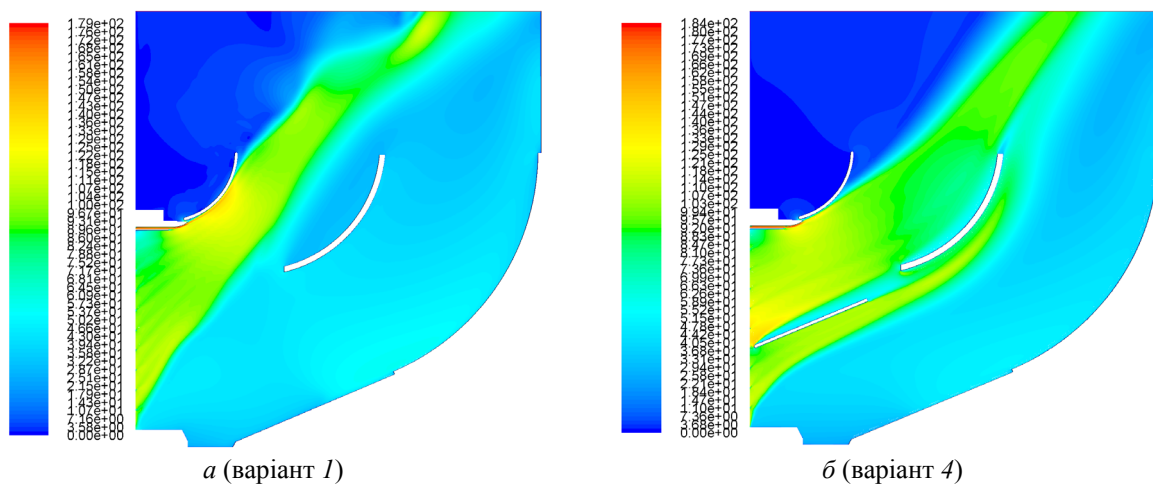


Рис. 6 – Розрахунковий розподіл швидкостей у дифузорах на режимі $\overline{GV}_2 = 0,5$

Висновки

Розрахункові дослідження чотирьох варіантів дифузорів турбіни типу К-300 на режимах $\overline{GV}_2 = 1; 0,75; 0,5$ довели, що встановлення ширококоримного дефлектора дозволяє поліпшити характеристики вихідного дифузора: покращити характер течії, зменшити розмір і інтенсивність циркуляційної зони біля втулки, знизити коефіцієнт повних втрат дифузора на режимах $\overline{GV}_2 < 0,75$. На таких режимах останній ступень і вихлопний патрубков працюють значну кількість часу на рік, враховуючи зміну клімату і підвищення температури.

Вперше досліджено модернізований варіант дифузора, в якому присутні тороподібний і ширококоримний дефлектори, і доведено, що така конструкція дифузора має поліпшені характеристики по відношенню до початкового варіанта. Така модернізація не потребує переробок системи жорсткості вихлопного патрубка, не впливає на міцність конструкції і її можна з незначними витратами виконати при капітальному ремонті турбіни.

Список літератури

1. Дейч М. Е., Зарянкин А. Е. *Газодинамика диффузоров и выхлопного патрубка турбомашин*. Москва: Энергия, 1970. 273 с.
2. Мигай В. К., Гудков Э. И. *Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин*. Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1981. 272 с.
3. Гаркуша А. В. *Аэродинамика проточной части паровых турбин*. Москва: Машиностроение, 1983. 184 с.
4. Гаркуша А. В., Юдин Ю. А. Работа последней ступени и выхлопного патрубка ЦНД различных конструкций. *Энергетическое машиностроение*. 1995. № 10. С. 203–208.
5. Юдин Ю. А., Лапузин А. В. Повышение эффективности выхлопных патрубков ЦНД паровых турбин с помощью

широкоримного дефлектора. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2005. № 6. С. 60–64. Бібліогр.: 6 назв. ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line).

6. Субботович В. П., Юдин Ю. А., Лапузин А. В., Юдин А. Ю., Швецов В. Л. Влияние неосесимметричного вдува потока в диффузоре на работу выхлопного патрубка ЦНД турбины. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2017. № 9(1231). С. 24–28. Бібліогр.: 5 назв. ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line). doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.03.

References (transliterated)

1. Deich, M. E. and Zaryankin A. E. (1970), *Gazodinamika diffuzorov i vykhlopnih patrubkov turbomashin* [Diffusers and exhaust chamber turbomachinery gas dynamics], Energiya [Energy], Moscow, Russia.
2. Migay, V. K. and Gudkov, E. I. (1981), *Proektirovanie i raschet vyihodnyih diffuzorov turbomashin* [Design and calculation of output diffusers of turbomachines], Mashinostroenie [Mechanical engineering], Leningrad, Russia.
3. Garkusha, A. V. (1983), *Aerodinamika protochnoy chasti parovykh turbin* [Aerodynamic of steam turbine flow path], Mashinostroenie [Mechanical engineering], Moscow, Russia.
4. Garkusha, A. V., Yudin, Yu. O. (1995), “Rabota posledney stupeni i vykhlopnogo patrubka TsND razlichnykh konstruktсий [Operation of last stage and exhaust chamber of LPC different constructions]”, *Energeticheskoye mashinostroenie* [Power engineering], no. 10, pp. 203–208.
5. Yudin Yu. O., Lapuzin O. V. (2005), “Povysheniye effektivnosti vykhlopnnykh patrubkov TsND parovykh turbin s pomoshch'yu shirokorezhimnyye deflektora [Efficiency increasing of steam turbine LPC exhaust chambers with wide-modes deflector]”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 6. pp. 60–64. ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line).
6. Subotovich V., Yudin Yu., Lapuzin A., Yudin A., 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 (print), ISSN 2707-7543 (on-line). doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.03.

Надійшла (received) 16.09.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

Субботович Валерій Петрович (Суботович Валерий Петрович, Subotovich Valery) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри турбінобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: alex78ua@yahoo.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7051-4758>.

Лапузін Олександр Вікторович (Лапузин Александр Викторович, Lapuzin Alexander) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри турбінобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6445-3979>.

Малимон Іван Іванович (Малимон Иван Иванович, Malymon Ivan) – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3162-4137>.