

А. С. РОГОВИЙ, А. С. АЗАРОВ, О. Л. ШУДРИК, О. Б. ПАНАМАРЬОВА, Д. В. ЛЕБЕДИНЕЦЬ

ВАЛІДАЦІЯ ВІДКРИТОЇ БІБЛІОТЕКИ OPENFOAM ГІДРОТУРБІН ДЛЯ ВИСОКОНАПІРНОГО ВІДЦЕНТРОВОГО КОМПРЕСОРА

Спеціальний програмний модуль до OpenFoam додано достатньо давно, більш ніж 10 років тому, й достатньо велика кількість робіт присвячена його використанню для вирішення проблем турбінобудування. Неточності моделювання можуть виникати за збільшення швидкості до надзвукової течії. Метою роботи є валідація відкритої бібліотеки OpenFoam гідротурбін для розрахунку течії у високонапірному відцентровому компресорі та знаходження оптимальних за ККД та співвідношенням повних тисків параметрів та моделі розрахунку. Для числового розрахунку використано осереднення за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, що застосовані в CFD-бібліотеці OpenFoam v. 2212. В роботі для замикання рівнянь математичної моделі використано дві найбільш вживаних для подібних задач моделі турбулентності: k-ε модель та SST-модель. Моделювання здійснено за допомогою модифікованої версії солвера sonicFoam, який доступний у OpenFoam. Максимальна помилка розрахунку співвідношення повного тиску в робочій зоні для усіх моделей склала 3%. Усі моделі погано поводяться у зоні низьких витрат. Нахил усіх кривих відповідає експериментальній характеристиці. Розрахунок за моделями з дуже гарними сітками в середньому приводить до збільшеного на 2% співвідношення тисків. Використання OpenFoam дозволяє точно (максимальна похибка не перевищує 5%) прогнозувати інтегральні параметри високонапірного відцентрового компресора. Найбільш точно ККД прогнозує модель SST із використанням сіток більше ніж 2,56 млн. елементів, але такої кількості елементів не достатньо для якісного прогнозу характеристик компресора за малих витрат. У подальших дослідженнях раціонально використовувати сітки, що складаються щонайменше з 5 млн. елементів та використовувати SST-модель турбулентності.

Ключові слова: відцентровий компресор, математичне моделювання, числовий розрахунок, валідація, політропний ККД, тиск.

A. ROGOVYI, A. AZAROV, O. SHUDRYK, O. PANAMARIOVA, D. LEVEDYNETS

VALIDATION OF THE HYDRAULIC TURBINE OPENFOAM LIBRARY FOR A HIGH-PRESSURE CENTRIFUGAL COMPRESSOR

A special program module was added to OpenFoam more than 10 years ago, and a large number of studies have been devoted to its use for solving turbine engineering problems. Modeling inaccuracies can occur when the velocity is increased to supersonic flow. The aim of this work is to validate the OpenFoam open library of hydraulic turbines for the a high-pressure centrifugal compressor flow calculation and finding the parameters and calculation model that are optimal in terms of efficiency and total/total pressure ratio. For the numerical calculation, we used Reynolds averaging of the Navier-Stokes equations, which are used in the CFD library OpenFoam v. 2212. In this work, the two most commonly used turbulence models for such problems are used to close the equations of the mathematical model: the k-ε model and the Shear stress transport (SST) model. The simulation was performed using a modified version of the sonicFoam solver, which is available in OpenFoam. The maximum error in calculating the total pressure ratio in the working zone for all models was 3%. All models behave poorly in the low mass flow rate zone. The slope of all curves corresponds to the experimental characteristic. The calculation using the models with very fine meshes on average determines a 2% increase in the total-to-total pressure ratio. Using OpenFoam, the integrated parameters of a high-pressure centrifugal compressor can be predicted accurately (maximum error does not exceed 5%). The most accurate efficiency is predicted by the SST model using meshes of more than 2.56 million elements, but this number of elements is not enough to predict the compressor's performance at low flow rate zone. In further research, it is rational to use grids consisting of at least 5 million elements and use the SST turbulence model.

Keywords: centrifugal compressor, mathematical modelling, numerical solution, validation, polytropic efficiency, pressure.

Вступ. Сьогодні числові методи вирішення задач гідроаеродинаміки широко використовуються інженерами та науковцями для вирішення різноманітних задач течії рідин та газів [1]. Задачі, що можуть бути розв'язані за використання даних методів, все більше ускладнюються, але виникає проблема коректного використання математичних моделей та моделей турбулентності для певних класів задач [2, 3]. Найбільш розповсюджені комерційні пакети симуляції течії в турбомашинах, такі як Ansys CFX є валідованим програмним комплексом, що вже використано для вирішення великої кількості задач течії пари, газів та рідин, має обмеження для використання в наукових дослідженнях внаслідок існування граничної кількості елементів для студентської ліцензії [4, 5]. З іншої сторони, більш доступний студентам, аспірантам та науковцям програмний комплекс OpenFoam значно складніший та потребує постійної валідації створюваних модулів та підпрограм [6, 7]. Верифікація означеного відкритого програмного комплексу дозволить вирішувати задачі більш точно без обмеження

кількості використаних для сітки елементів та зменшити необхідність експериментальних досліджень для оптимізації турбін, насосів та компресорів [8, 9].

Аналіз останніх досліджень. Спеціальний програмний модуль до OpenFoam додано достатньо давно, більш ніж 10 років тому й достатньо велика кількість робіт присвячена його використанню для вирішення проблем турбомашин. Так, в роботах [10, 11] зазначено про успішність його використання для задач гідротурбінобудування для нестисливих рідин. Новий солвер multiple reference frame (MRF) та інтерфейси зв'язку були розроблені та додані до OpenFoam, після чого в роботі [12] виконано подальшу валідацію для відцентрових насосів. В роботі [13] наведено інформацію про використання солверу на основі тиску для моделювання сумісного теплообміну. В якості валідаційного прикладу було використано лопать NASA C3X Film, і було визначено гарне узгодження параметрів з експериментальними даними. В подальшому розроблено наближений розв'язувач Рімана [14] для надзвукових течій й

проведено його валідації для такого типу течій та у порівнянні з комерційними програмами [15, 16]. Зазначено, що результати отримані в Openfoam, можуть бути використані для моделювання надзвучових течій у турбомашин [17]. Якісний розрахунок течії й особливо розподілів температур на лопатях турбін та компресорів дозволяє збільшити надійність машин та збільшити міжремонтні інтервали [18, 19].

Мета. Метою роботи є валідація відкритої бібліотеки OpenFoam гідротурбін для розрахунку течії у високонапірному відцентровому компресорі та знаходження оптимальних за ККД та співвідношенням повних тисків параметрів та моделі розрахунку.

Результати досліджень. Для числового розрахунку використано осереднення за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, що застосовані в CFD-бібліотеці OpenFoam v. 2212 [20]. Рівняння збереження маси, кількості руху та енергії:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{U}_{rel}) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{U})}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{U}_{rel} \bar{U}) + \rho (\bar{\Omega} \times \bar{U}) = -\bar{\nabla} p + \bar{\nabla} \cdot \tau; \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{U}_{rel} E) = -\bar{\nabla} p \cdot \bar{U} + \tau : (\bar{\nabla} \bar{U}) + \bar{\nabla} \cdot (k_{eff} \bar{\nabla} T) \quad (3)$$

де ρ – густина; p – тиск; \bar{U} – абсолютна швидкість; яка пов'язана з відносною швидкістю \bar{U}_{rel} та з кутовою швидкістю обертання домену $\bar{\Omega}$ наступним рівнянням:

$$\bar{U}_{rel} = \bar{U} - \bar{\Omega} \times \bar{r}. \quad (4)$$

Два додаткові члени у правій частині рівняння кількості руху враховують прискорення Кориоліса внаслідок обертання та відцентрову силу. Тензор напружень зсуву має вигляд:

$$\tau = \mu_{eff} \left[S - \frac{2}{3} (\bar{\nabla} \cdot \bar{U}) I \right], \quad (5)$$

де $S = \bar{\nabla} \bar{U} + \bar{\nabla} \bar{U}^T$. Ефективна в'язкість та ефективна теплопровідність є сумою молекулярних та турбулентних:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t, \quad k_{eff} = k + k_t. \quad (6)$$

Повна енергія E може бути виражена як

$$E = c_v T + \frac{1}{2} |\bar{U}|^2. \quad (7)$$

Цю систему рівнянь можна розв'язати для всієї області. В інерціальній системі відліку рівняння можна перетворити до оригінального вигляду, задавши кутову швидкість $\bar{\Omega} = 0$ [21].

В роботі для замикання рівнянь математичної

моделі використано дві найбільш вживаних для подібних задач моделі турбулентності [22]: k - ϵ модель [23] та k - ω SST-модель [24].

Під час моделювання в якості робочого середовища обрано повітря як ідеальний газ, а умови течії вважалися стаціонарними. Оскільки для прискорення обчислень використовувався псевдонестаціонарний розрахунок з певним кроком за часом для прискорення симуляції, розрахунок закінчувався після досягнення постійних значень нев'язань та витрати в компресорі. Осциляції параметрів течії вказують на можливі нестабільні робочі точки за певних характеристик потоку. Така ситуація особливо характерна для малих масових витрат у поєднанні з високим співвідношенням тисків, коли можливий помпаж призводить до тимчасових коливань масового потоку. Це може призвести до повної зупинки роботи компресора. Ці нестабільні коливання не можуть бути вирішені за допомогою моделі, представленої в даній статті.

Для моделювання обертання колеса компресора використано підхід MRF. В цьому підході область поділяється на стаціонарну та обертову області. В області обертання додаткові члени в рівняннях моделюють вплив рухомого ротора. Підхід MRF не враховує відносний рух рухомої зони відносно сусідніх зон, наприклад, сітка залишається фіксованою [25].

Моделювання здійснено за допомогою модифікованої версії солвера sonicFoam, який доступний у OpenFoam. Це солвер для стисливої рідини для до- та надзвучових течій, що ґрунтується на визначенні тиску. Як розширення, було реалізовано підхід MRF. За замовчуванням рівняння енергії у sonicFoam базується на внутрішній енергії. Однак ця форма не підходить для високошвидкісних течій. З цієї причини вирішувалося рівняння повної енергії (3). Збіжність розв'язку оцінюється за допомогою декількох контрольних точок по всій області. Крім того, контролювалася масова витрата на вході в компресор.

У рівняннях (1)–(7) дискретизація конвективних членів виконана за допомогою лінійної інтерполяції другого порядку (upwind) для \bar{U} , E . Градієнти дискретизувалися за допомогою центральної різницевої схеми. Інтегрування за часом для локального кроку за часом виконується з використанням неявної схеми Ейлера першого порядку.

Співвідношення повних тисків, втрати та політропний ККД оцінювалися для порівняння експериментальних даних та результатів моделювання. Вони визначаються наступним чином:

$$\pi^* = \frac{P_{out}^*}{P_{in}^*}; \quad \eta^* = \frac{\ln(\pi^*)}{\ln(T_{out}^*/T_{in}^*)} \frac{k-1}{k}; \quad \zeta = \frac{\Delta p^*}{0,5\rho \bar{V}^2}, \quad (8)$$

де P_{out}^* , P_{in}^* – повні тиски на виході та вході компресора; T_{out}^* , T_{in}^* – повні температури газу на виході та вході компресора; $k = 1,4$ – показник

адіабати; Δp^* – втрати повного тиску.

В розрахунку використано секторний підхід за якого ротор мав кутовий розмір $25,7^\circ$, лопатевий дифузор – 20° (виділено синім кольором на рис. 1). Компресор має вихідний діаметр робочого колеса 240 мм, кутову швидкість обертання 207500 хв^{-1} . Число лопатей напрямного апарату, що обертається – 14, число лопатей робочого колеса – 28, число лопатей лопатевого дифузора – 18.

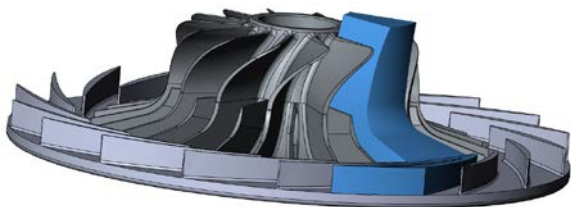


Рис. 1. Розрахункова модель високо напірного відцентрового компресора

Інтерфейс між статичним доменом лопатевого дифузора та доменом ротора, що обертається, визначено як Frozen Rotor [22]. Сіткові розбиття використані для валідації розрахунку наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Розмір сіток розрахункових доменів компресора

Сітковий регіон	Кількість елементів $\times 10^6$			
	Груба	Стандартна	Гарна	Дуже гарна
Робоче колесо	0,3	0,83	2,0	4,3
Дифузор	0,14	0,24	0,56	1,3
Разом	0,44	1,07	2,56	5,6

Граничні умови: вхід до робочого колеса – повний тиск величиною 0 Па та повна температура гальмування величиною 288 К. На виході задавалася масова витрата різної величини для отримання характеристики компресора. Для інших змінних на виході використовувалися граничні умови з нульовим градієнтом. Стінки вважалися нековзними та адіабатичними. Шорсткістю поверхні нехтували. Оскільки інформація про турбулентні умови на вході під час експериментальних досліджень не фіксувалася, то інтенсивність турбулентності на вході задавалася рівною 5 %.

Результати розрахунку співвідношення повних тисків для сіток різного розміру та використання різних моделей турбулентності у порівнянні з експериментальними даними наведено на рис. 2. Найменшу похибку можна спостерігати за використанням SST моделі турбулентності в зоні робочої точки.

Максимальна помилка розрахунку співвідношення повного тиску в робочій зоні для усіх моделей склала 3 % (рис. 2). Усі моделі погано поведуться у зоні низьких витрат. Нахил усіх кривих відповідає експериментальній характеристиці. Розрахунок за моделями з дуже гарними сітками в середньому визначає збільшене на 2 % співвідношення тисків. Для інших моделей

спостерігається зворотна картина – зменшене на 3 % співвідношення тисків. Однією з причин розбіжностей є алгоритм на основі тиску в запропонованому солвері. Цей метод призводить до помилок, коли потік наближається до надзвукових умов, що можуть виникати внаслідок відривання рідини від стінок лопатей. Ця причина може приводити до значних помилок розрахунку характеристики за k-ε моделлю у зоні малих витрат. Втрати за цих умов не враховуються належним чином. Використання солвера на основі густини, який було протестовано на тестовому прикладі Radiver [26], показав дещо кращі результати порівняно з представленим солвером. Однак, представлений компресор працює в дозвукових умовах, що робить застосовним представлений у даному дослідженні солвер.

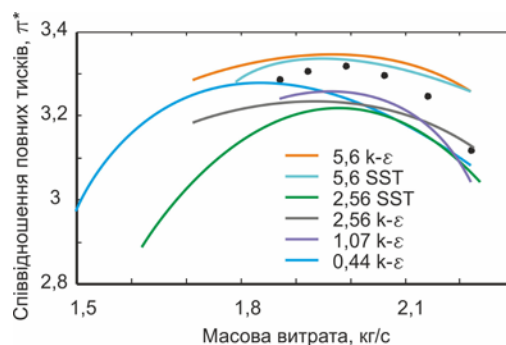


Рис. 2. Співвідношення повних тисків для різних сіток та моделей турбулентності

На рис. 3 представлено порівняння політропного ККД розрахованого за різних сіток та моделей турбулентності з експериментальними даними. Нахил усіх кривих відповідає експериментальній кривій. Максимальна похибка визначення ККД у робочому діапазоні компресора не перевищує 4 %. Найбільш точно ККД прогнозує модель SST із використанням сіток більше ніж 2,56 млн. елементів, але такої кількості елементів не достатньо якісно прогнозувати характеристику компресора за малих витрат. Таким чином, у подальших дослідженнях раціонально використовувати сітки, що складаються щонайменше з 5 млн. елементів та використовувати SST-модель турбулентності. Використання OpenFoam дозволяє точно (максимальна похибка не перевищує 5 %) прогнозувати інтегральні параметри високонапірного відцентрового компресора.

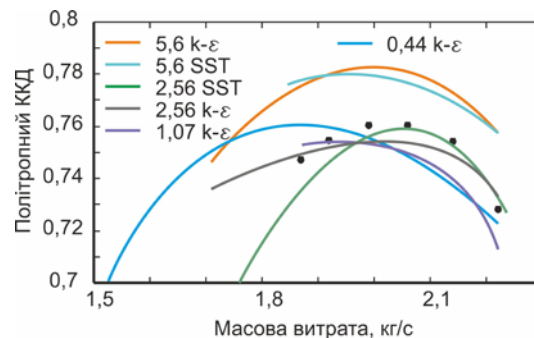


Рис. 3. Політропний ККД для різних сіток та моделей турбулентності

Висновки. В роботі проведено валідацію відкритої бібліотеки OpenFoam гідротурбін для розрахунку течії у високонапірному відцентровому компресорі. Використання OpenFoam дозволяє точно (максимальна похибка не перевищує 5 %) прогнозувати інтегральні параметри високонапірного відцентрового компресора.

Найбільш точно ККД прогнозує модель SST із використанням сіток більше ніж 2,56 млн. елементів, але такої кількості елементів не достатньо для якісного прогнозування характеристики компресора в зоні малих витрат. У подальших дослідженнях раціонально використовувати сітки, що складаються щонайменше з 5 млн. елементів та використовувати SST-модель турбулентності.

Максимальна помилка розрахунку співвідношення повного тиску в робочій зоні для усіх моделей склала 3 %. Усі моделі погано поведуться у зоні малих витрат. Нахил усіх кривих відповідає експериментальній характеристиці. Розрахунок за моделями з дуже гарними сітками в середньому визначає збільшене на 2 % співвідношення тисків.

Список літератури

1. Роговий А. С., Азаров А. С., Демчук Р. М. Удосконалення характеристик робочого колеса високонапірного відцентрового компресора проектуванням за допомогою САПР. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2023. No. 1. P. 25–30. doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.04
2. Роговий А. С. *Розробка теорії та методів розрахунку вихорокамерних нагнітачів: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.17.* Харків, 2017. 364 с.
3. Rezvaya K., Cherkashenko M., Drankovskiy V., Tynyanova I., Makarov V. Using mathematical modeling for determination the optimal geometric parameters of a pump-turbine water passage. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) (2020, Istanbul).* Istanbul, 2020. P. 212–216. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263139
4. Rogovyi A., Shudryk O., Tulska A., Basova Y., Rezvaya K., Makarov V., Machado J. Using modern mechanical design methods for determining the main characteristics of a cryogenic centrifugal pump. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics.* 2023. Vol. 13. P. 198–208.
5. Шевченко Н. Г., Калюжний В. В., Андрієвська В. С. Чисельне моделювання течії технологічної рідини у трубах кольтюбінгової установки. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2023. No. 1. P. 60–65. doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.10
6. Heinrich M., Schwarze R. Simulation of the compressor stage of a turbocharger: validation of the Open Source Library OPENFOAM. *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air.* 2013. Vol. 55232. P. V06BT37A010.
7. Adam J., Heinrich M., Schwarze R. Influence of different design parameters on side channel compressor performance. *Forschung im Ingenieurwesen.* 2022. Vol. 86. P. 819–827.
8. Krupa E., Rezvaya K., Makarov V. Parameter Estimation of Hydraulic Equipment of Hydro-Electric Power Station Based on Numerical Simulation of the Spatial Flow. *Conf. Proc. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) (13–17 September 2021, Kharkiv, Ukraine).* Kharkiv, 2021. P. 681–685.
9. Kondus V., Pavlenko I., Kulikov O., Liaposhchenko O. Development of a High-Rotational Submersible Pump for Water Supply. *Water.* 2023. Vol. 15, no. 20. P. 3609. doi: 10.3390/w15203609
10. Page M., Beaudoin M., Giroux A. M. Steady-state capabilities for hydroturbines with OpenFOAM. *International Journal of Fluid Machinery and Systems.* 2011. Vol. 4, no. 1. P. 161–171.
11. Nilsson H. Evaluation of OpenFOAM for CFD of Turbulent Flow in Water Turbines. *Proc. 23rd IAHR Symposium (October 2006, Yokohama, Japan).* Yokohama, 2006. P. 1–9.
12. Petit O., Page M., Beaudoin M., Nilsson H. The ERCOFTAC centrifugal pump OpenFOAM case-study. *Proc. of the 3rd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problem in Hydraulic Machinery and Systems (14–16 October 2009, Brno, Czech Republic).* Brno, 2009. P. 14–16.
13. Mangani L., Cerutti M., Maritano M., Spel M. Conjugate heat transfer analysis of NASA C3X film cooled vane with an object-oriented CFD code. *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air.* 2010. Vol. 4. P. 1805–1814.
14. Borm O., Kau H. P. Unsteady aerodynamics of a centrifugal compressor stage: Validation of two different CFD solvers. *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air.* 2012. Vol. 8. P. 2753–2764.
15. Oliani S., Casari N., Carnevale M. ICSFoam: An OpenFOAM library for implicit coupled simulations of high-speed flows. *Computer Physics Communications.* 2023. Vol. 286. P. 108673.
16. Li Z. L., Lu X. G., Wu Y. F., Han G. Quantitative investigation of the turbulence model effect on high-pressure-ratio centrifugal compressor performance prediction. *International Communications in Heat and Mass Transfer.* 2023. Vol. 142. P. 106644.
17. Fan M., Dazin A., Bois G., Romano F. Effect of inlet leakage flow on the instability in a radial vaneless diffuser. *Physics of Fluids.* 2023. Vol. 35, issue 1. P. 014105.
18. Фатєєва Н. М., Шевченко Н. Г., Фатєєв О. М. Надійність гідропневмоагрегатів металорізального устаткування. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2016. No. 41 (1213). P. 84–87.
19. Fatieieva N., Fatyeyev O., Ponomarov V. Advantages of using hydraulic equipment of modular mounting in the modernization of machine hydrosystems. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2022. No. 1. P. 33–41.
20. OpenFOAM, 2022. Version 2212. URL: <http://www.openfoam.com> (дата звернення: 20.11.2023).
21. Chernetskaya-Beletskaya N., Rogovyi A., Baranov I., Krut A., Miroshnikova M., Bragin N. Increasing the efficiency of highly concentrated coal-water fuel based on the simulation of non-Newtonian fluid flow. *MATEC Web of Conferences.* 2019. Vol. 294. P. 01009.
22. Роговий А., Азаров А., Овчаров Є., Шудрик О., Толстий П. Картини течії газу у високонапірному відцентровому компресорі. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Сер.: Машинознавство та САПР.* Харків: НТУ «ХПІ», 2023. № 1. С. 82–91.
23. De la Hoz J. S., Valencia G., Forero J. D. Reynolds Averaged Navier–Stokes Simulations of the Airflow in a Centrifugal Fan Using OpenFOAM. *Int. Rev. Model. Simul.* 2019. Vol. 12. P. 230–242.
24. Besagni G., Inzoli F. Computational fluid-dynamics modeling of supersonic ejectors: Screening of turbulence modeling approaches. *Applied Thermal Engineering.* 2017. Vol. 117. P. 122–144.
25. Wilhelm D. Rotating flow simulations with OpenFOAM. *International Journal of Aeronautical Science & Aerospace Research.* 2015. Vol. 1 (001).
26. Borm O., Jemcov A., Kau H. P. Density based Navier Stokes solver for transonic flows. *Proc. of 6th OpenFOAM workshop, Pennstate university (June 2011, USA).* P. 1–30.

References (transliterated)

1. Rogovyi A. S., Azarov A. S., Demchuk R. M. Udosoknalennya kharakterystyk robochoho kola vysokonapimoho vidtsentrovoho kompresora proektuvanniam za dopomohoyu SAPR [Improving characteristics of the impeller of a high-pressure centrifugal compressor by designing with the help of CAD]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023, no. 1, pp. 25–30. doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.04
2. Rogovyi A. S. *Rozrobka teoriyi ta metodiv rozrakhunku vykhorokamernykh nahnitachiv: dys. ... d-ra tekhn. nauk 05.05.17* [Development of the theory and designing methods of vortex chamber superchargers. Dr. eng. sci. diss.]. Kharkiv, 2017. 364 p.
3. Rezvaya K., Cherkashenko M., Drankovskiy V., Tynyanova I., Makarov V. Using mathematical modeling for determination the optimal geometric parameters of a pump-turbine water passage. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and*

- Power Systems (IEPS)* (2020, Istanbul). Istanbul, 2020, pp. 212–216. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263139
4. Rogovyi A., Shudryk O., Tulska A., Basova Y., Rezvaya K., Makarov V., Machado J. Using modern mechanical design methods for determining the main characteristics of a cryogenic centrifugal pump. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. 2023, vol. 13, pp. 198–208.
 5. Shevchenko N. H., Kalyuzhnyy V. V., Andriyevs'ka V. S. Chysel'ne modelyuvannya techiyi tekhnolohichnoyi ridyny u trubakh kolyubinhovoyi ustanovky [Numerical simulation of process fluid flow in the pipes of a coiled tubing installation]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023, no. 1, pp. 60–65. doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.10
 6. Heinrich M., Schwarze R. Simulation of the compressor stage of a turbocharger: validation of the Open Source Library OPENFOAM. *In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. 2013, vol. 55232, p. V06BT37A010.
 7. Adam J., Heinrich M., Schwarze R. Influence of different design parameters on side channel compressor performance. *Forschung im Ingenieurwesen*. 2022, vol. 86, pp. 819–827.
 8. Krupa E., Rezvaya K., Makarov V. Parameter Estimation of Hydraulic Equipment of Hydro-Electric Power Station Based on Numerical Simulation of the Spatial Flow. *Conf. Proc. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) (13–17 September 2021, Kharkiv, Ukraine)*. Kharkiv, 2021, pp. 681–685.
 9. Kondus V., Pavlenko I., Kulikov O., Liaposhchenko O. Development of a High-Rotational Submersible Pump for Water Supply. *Water*. 2023, vol. 15, no. 20, p. 3609. doi: 10.3390/w15203609
 10. Page M., Beaudoin M., Giroux A. M. Steady-state capabilities for hydroturbines with OpenFOAM. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*. 2011, vol. 4, no. 1, pp. 161–171.
 11. Nilsson H. Evaluation of OpenFOAM for CFD of Turbulent Flow in Water Turbines. *Proc. 23rd IAHR Symposium (October 2006, Yokohama, Japan)*. Yokohama, 2006, pp. 1–9.
 12. Petit O., Page M., Beaudoin M., Nilsson H. The ERCOFTAC centrifugal pump OpenFOAM case-study. *Proc. of the 3rd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problem in Hydraulic Machinery and Systems (14–16 October 2009, Brno, Czech Republic)*. Brno, 2009, pp. 14–16.
 13. Mangani L., Cerutti M., Maritano M., Spel M. Conjugate heat transfer analysis of NASA C3X film cooled vane with an object-oriented CFD code. *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. 2010, vol. 4, pp. 1805–1814.
 14. Borm O., Kau H. P. Unsteady aerodynamics of a centrifugal compressor stage: Validation of two different CFD solvers. *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. 2012, vol. 8, pp. 2753–2764.
 15. Oliani S., Casari N., Carnevale M. ICSFoam: An OpenFOAM library for implicit coupled simulations of high-speed flows. *Computer Physics Communications*. 2023, vol. 286, pp. 108673.
 16. Li Z. L., Lu X. G., Wu Y. F., Han G. Quantitative investigation of the turbulence model effect on high-pressure-ratio centrifugal compressor performance prediction. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2023, vol. 142, pp. 106644.
 17. Fan M., Dazin A., Bois G., Romano F. Effect of inlet leakage flow on the instability in a radial vaneless diffuser. *Physics of Fluids*. 2023, vol. 35, issue 1, p. 014105.
 18. Fatieieva N. M., Shevchenko N. H., Fatyeyev O. M. Nadiynist' hidropnevmoahrehativ metalorizal'noho ustatkuvannya [Reliability of the hydraulic and pneumatic aggregates of the metal cutting equipment]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 41 (1213), pp. 84–87.
 19. Fatieieva N., Fatyeyev O., Ponomarov V. Advantages of using hydraulic equipment of modular mounting in the modernization of machine hydrosystems. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2022, no. 1, pp. 33–41.
 20. *OpenFOAM*, 2022, Version 2212. Available at: <http://www.openfoam.com> (accessed 20.11.2023).
 21. Chernetskaya-Beletskaya N., Rogovyi A., Baranov I., Krut A., Miroshnikova M., Bragin N. Increasing the efficiency of highly concentrated coal-water fuel based on the simulation of non-Newtonian fluid flow. *MATEC Web of Conferences*. 2019, vol. 294, p. 01009.
 22. Rogovyi A., Azarov A., Ovcharov Ye., Shudryk O., Tolsty P. Kartyny techiyi hazu u vysokonapirnomu vidtsentrovomu kompresori [Gas flow patterns in a high-pressure centrifugal compressor]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI". Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR* [Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Engineering and CAD]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023, no. 1, pp. 82–91.
 23. De la Hoz J. S., Valencia G., Forero J. D. Reynolds Averaged Navier–Stokes Simulations of the Airflow in a Centrifugal Fan Using OpenFOAM. *Int. Rev. Model. Simul.* 2019, vol. 12, pp. 230–242.
 24. Besagni G., Inzoli F. Computational fluid-dynamics modeling of supersonic ejectors: Screening of turbulence modeling approaches. *Applied Thermal Engineering*. 2017, vol. 117, pp. 122–144.
 25. Wilhelm D. Rotating flow simulations with OpenFOAM. *International Journal of Aeronautical Science & Aerospace Research*. 2015, vol. 1 (001).
 26. Borm O., Jemcov A., Kau H. P. Density based Navier Stokes solver for transonic flows. *Proc. of 6th OpenFOAM workshop, Pennstate university (June 2011, USA)*. P. 1–30.

Надійшла (received) 17.12.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Роговий Андрій Сергійович (Rogovyi Andrii) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6057-4845>; e-mail: asrogovoy@ukr.net

Азаров Андрій Сергійович (Azarov Andrii) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7119-715X>; e-mail: andrii.azarov@mit.khpi.edu.ua

Шудрик Олександр Леонідович (Shudryk Oleksandr) – кандидат технічних наук, ТОВ «Регіон», провідний технолог проектно-технологічного відділу; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0991-2498>; e-mail: o.shudryk@region.if.ua

Панамарьова Ольга Борисівна (Panamariova Olga) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4080-4532>; e-mail: olga.panamariova@khpi.edu.ua

Лебединець Денис Віталійович (Lebedynets Denys) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістрант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3344-3130>; e-mail: denys.lebedynets@mit.khpi.edu.ua