

*А. С. РОГОВИЙ, О. Л. ШУДРИК, С. І. ЛУК'ЯНЕЦЬ, А. О. НЕСКОРОЖЕНИЙ, Д. В. ЛЕБЕДИНЕЦЬ*

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА ПРИ ПЕРЕКАЧУВАННІ БІНГАМІВСЬКОЇ РІДИНИ ІЗ РІЗНИМИ ЗНАЧЕННЯМИ ПОЧАТКОВИХ НАПРУГ ЗСУВУ**

Загальні методики проектування відцентрових насосів засновані на особливостях розрахунку та експериментальних даних щодо перекачування води. З іншої сторони, перекачування неньютонівських рідин, та Бінгамівських зокрема, можуть змінювати положення оптимальних робочих точок та змінювати характеристики. Використання числових методик дозволяє не тільки пришвидшити пошук оптимальних проточних частин, але й перевірити можливість роботи насоса за екстремальних параметрів роботи із різними показниками в'язкості неньютонівської рідини: від нульової в'язкості (ідеальна рідина) до надзвичайно великих значень та створити більш універсальні методики проектування насосів різних типів. Загальні методики проектування відцентрових насосів для перекачування неньютонівських рідин передбачають коригування характеристики в залежності від ефективної в'язкості, яка для Бінгамівської рідини розраховується за структурною в'язкістю. В роботі визначено вплив значень початкових напруг зсуву Бінгамівської рідини на характеристик відцентрового насоса шляхом вирішення рівнянь Рейнольдса, нерозривності, моделі турбулентності та реологічної моделі Бінгамівської рідини. Отримано, що за однієї подачі, напір, що є на виході з насосу зменшується не більше ніж на 5,1 %. Відбувається невеличке зміщення характеристики у зону менших витрат. Таким чином, початкові напруги зсуву практично не мають впливу на напірну характеристику відцентрового насоса. Початкові напруги зсуву мають достатній вплив на ефективність роботи насоса, що треба враховувати їх під час проектування проточної частини. ККД зменшується на 10 % за перекачування рідини з початковими напругами зсуву 100 Па. Зменшення ефективності роботи насоса може бути пов'язана з кінематичними параметрами роботи насоса та наслідком зменшення тисків на лопаті.

**Ключові слова:** відцентровий насос, Бінгамівська рідина, початкові напруги зсуву, методика розрахунку, числовий розрахунок.

*A. ROGOVYI, O. SHUDRYK, S. LUKIANETS, A. NESKOROZHENYI, D. LEBEDYNETS*

## **CHARACTERISTICS OF CENTRIFUGAL PUMP FOR PUMPING BINGHAM LIQUID WITH DIFFERENT VALUES OF YIELD STRESSES**

General techniques for designing centrifugal pumps are based on calculation features and experimental data on water pumping. On the other hand, pumping non-Newtonian liquids, and Bingham liquids in particular, can change the position of the best efficiency points and change the characteristics. The use of numerical methods allows not only to speed up the search for optimal flow parts, but also to check the possibility of pump operation under extreme operating parameters with different viscosities of a non-Newtonian liquid: from zero viscosity (ideal liquid) to extremely high values, and to create more universal design methods pumps of various types. General techniques for designing centrifugal pumps for pumping non-Newtonian fluids involve adjusting the characteristic depending on the effective viscosity, which for Bingham fluid is calculated from the plastic viscosity. The paper determines the influence of the values of the yield stresses of the Bingham fluid on the characteristics of the centrifugal pump by solving the Reynolds equations, continuity, the turbulence model and the rheological model of the Bingham fluid. It was found that with the same flow rate, the pressure at the pump outlet decreases by no more than 5,1 %. There is a slight shift in the characteristic to the zone of lower flow rate. Thus, the yield stresses have practically no effect on the pressure characteristic of the centrifugal pump. The yield stresses have a sufficient influence on the pump efficiency that they must be considered during the design of the flow part. The efficiency decreases by 10 % when pumping liquid with yield stresses of 100 Pa. A decrease in the efficiency of the pump may be related to the kinematic parameters of the pump and the result of a decrease in pressure distribution on the blade.

**Keywords:** centrifugal pump, Bingham fluid, yield stresses, design method, numerical solution.

**Вступ.** Одним з найбільш розповсюджених у промисловості та господарстві типів насосів є відцентровий насос [1]. Достатня простота конструкції та надійність експлуатації дозволяє використовувати його для перекачування практично будь-яких рідин, у тому числі рідин, що виявляють властивості неньютонівських рідин [2]. Загальні методики проектування відцентрових насосів засновані, в першу чергу, на особливостях розрахунку та експериментальних даних щодо перекачування найбільш розповсюджених рідин, таких як вода [3]. З іншої сторони, перекачування неньютонівських рідин, та Бінгамівських зокрема, можуть змінювати положення оптимальних робочих точок та змінювати характеристики [4, 5]. Особливості течії неньютонівських рідин, в останні часи, все більше привертають уваги дослідників внаслідок відмінності знаходження основних параметрів роботи насосів та гідроапаратури [6]. Крім того, у багатьох технологічних процесах різних галузей виробництва все більше використовуються багатокомпонентні рідини, біополімери, хімічні реагенти та ін., що

приводить до зміни реологічних показників рідин та до їх неньютонівської поведінки [7].

**Аналіз останніх досліджень.** Явні зміни характеристик течії неньютонівської рідини приводять до ускладнення знаходження характеристик насосів та гідроапаратів внаслідок неможливості якісного прогнозування втрат енергії на місцевих опорах та через тертя [8]. На відміну, від великої кількості експериментальних даних, що наявні для визначення коефіцієнтів місцевого опору та інших втрат, пов'язаних з відривами рідини, для звичайних рідин, для неньютонівських рідин практично відсутня інформація щодо таких особливостей течії [9].

Класичний підхід до проектування проточної частини відцентрового насоса для перекачування неньютонівських рідин складається з двох етапів: проектування насоса для перекачування води та перерахування характеристик з урахуванням ефективної в'язкості [5]. Але такий підхід має достатньо велику кількість недоліків: проектування практично не залежить від конкретного випадку рідини, її складу та реологічних характеристик та

може давати помилкові значення очікуваних характеристик спроектованого насоса.

В такому випадку, все більшого розповсюдження отримують методи визначення характеристик течії за допомогою числового моделювання шляхом вирішення рівнянь Нав'є-Стокса осереднених за Рейнольдсом [10]. Обчислювальна гідродинаміка дозволяє значно пришвидшити аналіз характеристик течії, та визначення характеристик насосів [11].

Використання числових методик дозволяє не тільки пришвидшити пошук оптимальних проточних частин, але й перевірити можливість роботи насоса за екстремальних параметрів роботи із різними показниками в'язкості неньютонівської рідини: від нульової в'язкості (ідеальна рідина) до надзвичайно великих значень та створити більш універсальні методики проектування насосів різних типів [12, 13].

Сучасні методи автоматичного проектування дозволяють створювати проточні частини насосів витрачаючи на цей процес мінімальний час. Для створення проточних частин турбомашин найчастіше використовуються Ansys [14], AxStream [15] та ін.

**Мета.** Метою роботи є визначення характеристик відцентрового насоса за перекачування Бінгамівської рідини із різними значеннями початкових напруг зсуву.

**Результати досліджень.** Для дослідження використано відцентровий насос, що було спроектовано за допомогою програми Ansys VistaCPD для наступних параметрів: подача  $Q = 500 \text{ м}^3/\text{год}$ , напір  $H = 30 \text{ м}$ , частота обертання вала насоса  $n = 1450 \text{ хв}^{-1}$ , рідина – вода. Загальна розрахункова схема спроектованого насоса наведена на рис. 1.

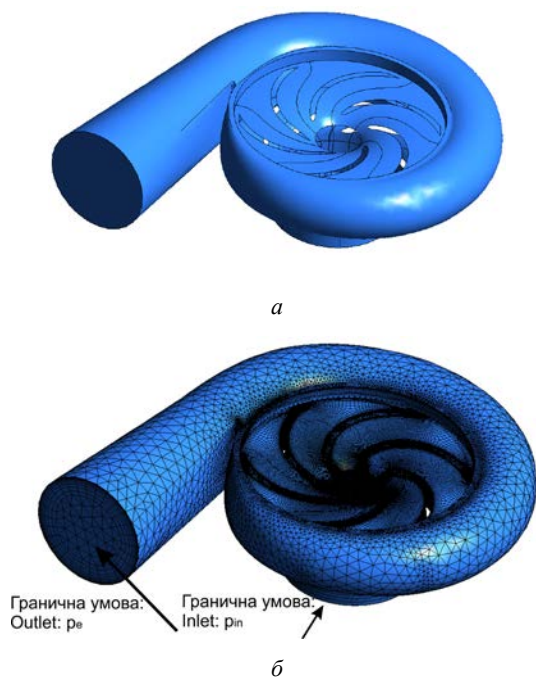


Рис. 1. Розрахункова та сіткова моделі змодельованого відцентрового насоса

Моделювання здійснено на основі використання модулів пакету програм Ansys: BladeGen, TurboGrid,

CFX. Сітка спірального відводу виконана з тетраедрів та призм на стінках, сектора, що включає лопать – з гексаедрів. Сітка підводу рідини складалася також з гексаедрів. Загальна кількість елементів всієї моделі включає 500 тис. елементів, що не перевищує обмеження студентської ліцензії Ansys для розрахунків течії рідин та газів [16].

Моделювання здійснено на основі вирішення системи рівнянь: рівняння Нав'є-Стокса осереднені за Рейнольдсом, рівняння нерозривності, рівняння моделі турбулентності « $k-\epsilon$ » та реологічна модель Бінгамівської рідини [17, 18]. Моделювання здійснено на основі секторного підходу: сіткова модель робочого колеса, яка включала 6 лопатей розбивалася на 6 секторів, а в розрахунку приймав участь лише один сектор. Така сама процедура здійснена для каналу підводу. Загальна модель розбита на три частини: дві нерухомі (підвід та спіральний відвід) та одна рухома (робоче колесо з одним сектором). Рухомий домен обертася зі швидкістю  $n = 1450 \text{ хв}^{-1}$ . Між трьома доменами використані інтерфейси. Переход рідини через інтерфейси між рухомих та нерухомим доменом моделювався на основі методу Frozen Rotor [19].

Граничні умови (рис. 1, б): на вході до підводу задавався загальний відносний тиск 0 Па, на виході зі спірального відводу – статичний тиск різного значення для моделювання характеристики насоса від 0 до 3,1 атм. Розрахунок виконувався до досягнення стабільності витрати, що проходить через насос. Значення витрати повинне було не змінюватися протягом щонайменше 300 ітерацій. В середньому розрахунок кожної точки характеристики вимагав 1000 ітерацій.

Для уникнення сингулярності реологічних співвідношень Бінгамівських пластиків використалася регуляризація в'язкості при значеннях швидкості зсуву між шарами близьких до нуля [21]. Для цього обрана модель Гершеля-Балклі з виправленням Папанастасіу:

$$\mu = \frac{\mu_B \dot{\gamma}^n + \tau_0 (1 - e^{-m\dot{\gamma}/G})}{\dot{\gamma}}$$

де  $\tau_0$  – початкова напруга зсуву;  $\dot{\gamma}$  – швидкість зсуву між шарами рідини;  $\mu_B$  – структурна в'язкість;  $m$  – регуляризаційний параметр, що дорівнює для даного дослідження 1000, внаслідок компромісу між точністю рішення та часом розрахунку;  $G$  – швидкість зсуву між шарами рідини незбуреного потоку;  $n = 1$  – показник ступеня (індекс течії) для Бінгамівської рідини.

На рис. 2 наведено порівняння впливу початкової напруги зсуву на характеристики спроектованого відцентрового насоса. Складно помітити різницю в характеристиках для  $\tau_0 = 0-100 \text{ Па}$ . За однієї подачі напір, що є на виході з насоса, зменшується не більше ніж на 5,1 %. Відбувається невеличке зміщення характеристики у зону менших витрат. Це практично мало впливає на значення напору за однієї витрати, але може значно вплинути на ефективність. Під час

моделювання для усіх випадків використовувалася одна й та сама структурна в'язкість, яка дорівнювала динамічній в'язкості води  $\mu_B = 0,00089$  Па·с. Таким чином, можна зробити висновок, що початкові напруги зсуву, що знаходяться в діапазоні  $\tau_0 = 0-100$  Па практично не мають впливу на напірну характеристику відцентрового насоса.

На рис. 3 наведено порівняння впливу початкової напруги зсуву на ефективність спроектованого відцентрового насоса. За однієї подачі, особливо близько до оптимальної точки роботи насоса за ККД, ефективність зменшується максимально на 10% в абсолютному вираженні. Таким чином, можна зробити висновок, що початкові напруги зсуву, що знаходяться в діапазоні  $\tau_0 = 0-100$  Па мають достатній вплив на ефективність роботи насоса, що треба його враховувати під час проектування проточної частини насоса.

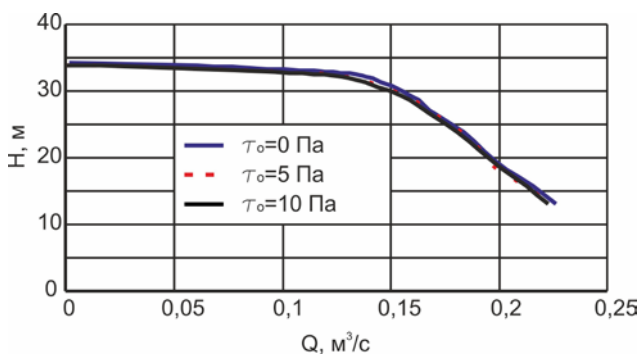


Рис. 2. Характеристика змодельованого відцентрового насоса за різних початкових напруг зсуву рідини

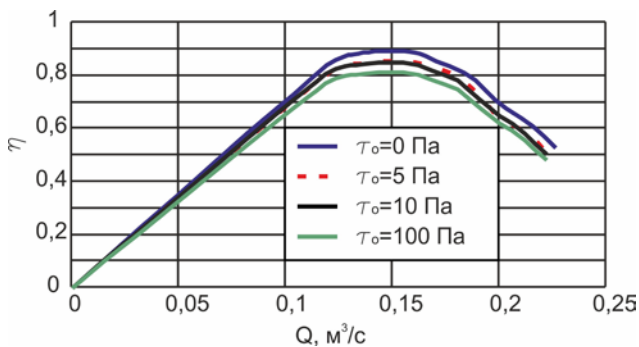


Рис. 3. ККД змодельованого відцентрового насоса за різних початкових напруг зсуву рідини

Загальні методика проектування відцентрових насосів для перекачування неньютонівських рідин передбачають коригування характеристики в залежності від ефектної в'язкості, яка для Бінгамівської рідини розраховується за структурною в'язкістю. В такому випадку, не повинна спостерігатися різниця в характеристиках насоса за різних значень початкових напруг зсуву. Це дійсно підтверджується для напірної характеристики насоса, але не підтверджується для розрахунку ефективності. Зменшення ефективності роботи насоса може бути пов'язана з кінематичними параметрами роботи насоса та наслідком зменшення тисків на лопаті (рис. 4). На рис. 4 представлено розподіл тисків вздовж лопатей

робочого колеса для  $\bar{s} = 0,5$  (турбоповерхня проходить посередині висоти лопаті).

На рис. 5 наведено розподіл статичних відносних тисків у меридіональній проекції для  $Q = 0,12$  м³/с за різних початкових напруг зсуву. Початкові напруги зсуву практично не впливають на розподіл тисків. Різниця в тисках можна помітити лише на виході з насоса. Вона не перевищує 5 %.

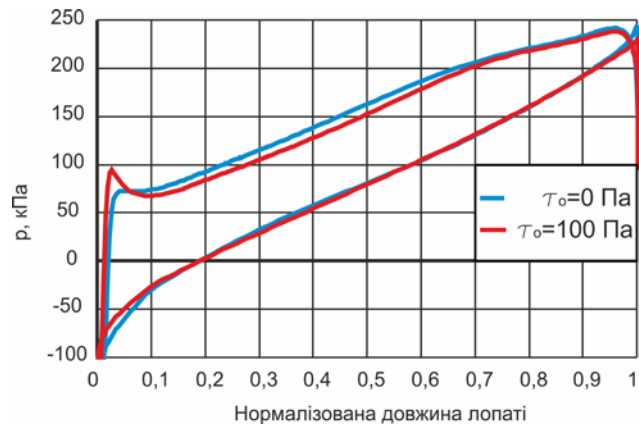


Рис. 4. Розподіл тисків вздовж лопаті ( $\bar{s} = 0,5$ ) робочого колеса насоса ( $Q = 0,12$  м³/с)

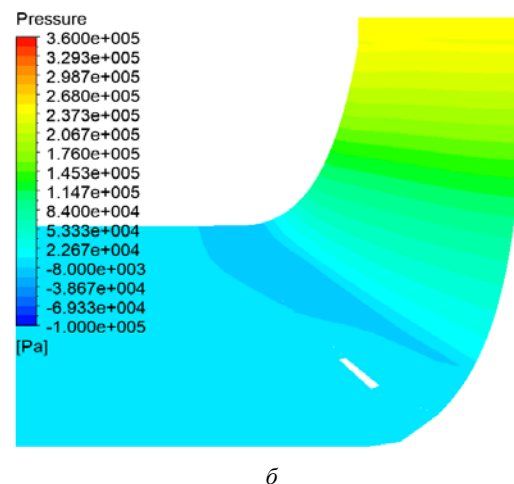
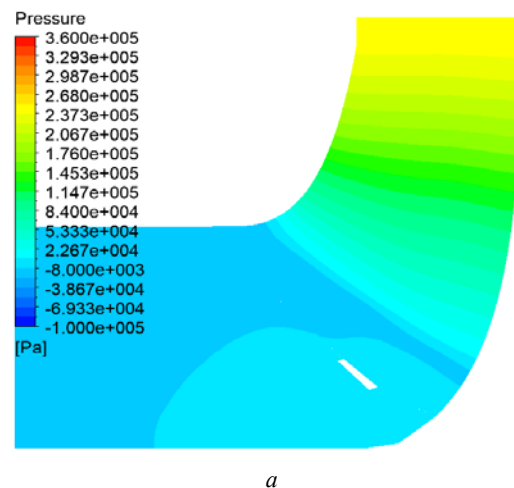


Рис. 5. Розподіл тисків у меридіональній проекції ( $Q = 0,12$  м³/с):  
а –  $\tau_0 = 0$  Па; б –  $\tau_0 = 100$  Па

**Висновки.** Визначено вплив значень початкових напруг зсуву Бінгамівської рідини на характеристики відцентрового насоса шляхом вирішення рівнянь Рейнольдса, нерозривності, моделі турбулентності та реологічної моделі Бінгамівської рідини.

За однієї подачі напір, що є на виході з насоса, зменшується не більше ніж на 5,1 %. Відбувається невеличке зміщення характеристики у зону менших витрат. Це практично мало впливає на значення напору за однієї витрати, але може значно вплинути на ефективність. Таким чином, початкові напруги зсуву, що знаходяться в діапазоні  $\tau_0 = 0\text{--}100$  Па практично не мають впливу на напірну характеристику відцентрового насоса.

Початкові напруги зсуву, що знаходяться в діапазоні  $\tau_0 = 0\text{--}100$  Па мають достатній вплив на ефективність роботи насоса, що треба враховувати під час проектування. ККД насоса за перекачування рідини з  $\tau_0 = 100$  Па зменшується на 10 % у порівнянні з ККД насоса, що перекачує рідину з  $\tau_0 = 0$  Па. Зменшення ефективності роботи насоса може бути пов'язана з кінематичними параметрами роботи насоса та наслідком зменшення тисків на лопаті.

#### Список літератури

- Kondus V. Y., Gusak O. G., Yevtushenko J. V. Investigation of the operating process of a high-pressure centrifugal pump with taking into account of improvement the process of fluid flowing in its flowing part. *In Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1741, no. 1. P. 012012.
- Gusak A., Demchenko O., Kaplun I. Application of small-sized low speed axial stages in well pumps for water supply. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 39. P. 35–42.
- Tkach P., Yashchenko A., Gusak O., Khovanskyy S., Panchenko V., Grechka I. Improvement of cavitation erosion characteristics of the centrifugal inducer stage with the inducer bush. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 4 (8). P. 24–31.
- Occari M., Mazzanti V., Mollica F., Munari E., Pinelli M., Suman A. Numerical Simulations of a Centrifugal Pump With a Non-Newtonian Fluid: Influence on Performances of Different Rheological Modelling. *Proc. of the ASME-JSME-KSME 2019 8th Joint Fluids Engineering Conference. Vol. 2: Computational Fluid Dynamics (28 July–1 August 2019, San Francisco, California, USA)*. 2019. P. AJKFluids2019-4940, V002T02A016, 13 p. doi: 10.1115/AJKFluids2019-4940
- Graham L. J., Pullum L., Slatter P., Sery G., Rudman M. Centrifugal pump performance calculation for homogeneous suspensions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2009. Vol. 87 (4). P. 526–533.
- 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.
- Nabwey H. A., Rahbar F., Armaghani T., Rashad A. M., Chamkha A. J. A Comprehensive Review of Non-Newtonian Nanofluid Heat Transfer. *Symmetry*. 2023. Vol. 15 (2). P. 362.
- Rogovyi A., Chernetska-Biletska N., Miroshnykova M., Baranov I., Polupan Y. Improvement of cleaning parameters of pipeline elements based on simulation of movement of solid magnetite particles in electrically conductive liquid. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 1, no. 5 (121). P. 38–46.
- Fester V. G., Kazadi D. M., Mbiya B. M., Slatter P. T. Loss coefficients for flow of Newtonian and non-Newtonian fluids through diaphragm valves. *Chemical Engineering Research and Design*. 2007. Vol. 85 (9). P. 1314–1324.
- Роговий А. С., Лук'янець С. І. Кінематичні параметри течії нафти у вихорокамерному насосі. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2022. No. 1. P. 59–65.

doi: 10.20998/2411-3441.2022.1.09

- Роговий А. С. *Використання методів числового вирішення задач інженерного аналізу*: навч. посіб. Харків: ХНАДУ, 2019. 112 с.
- Donmez M., Yemenici O. A numerical study on centrifugal pump performance with the influence of non-Newtonian fluids. *International Journal Sciences*. 2019. Vol. 8. P. 39–45.
- Buratto C., Occari M., Aldi N., Casari N., Pinelli M., Spina P. R., Suman A. Centrifugal pumps performance estimation with non-Newtonian fluids: review and critical analysis. *In Proc. of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics*. 2017. P. ETC2017-248.
- Usman I. U., Abbas K., Abubakar A. M., Mönnig R., Abdul A. Z., Alhodali M. A. J. ANSYS-CFX Simulation and Experimental Studies on Centrifugal Pump Impeller Design: Performance Effects Using Corrosive and Non-corrosive Resources. *International Journal of Engineering and Applied Physics*. 2023. Vol. 3 (2). P. 765–779.
- Шевченко Н. Г., Іващенко В. Ю., Рублевський Є. Ю., Загора О. О. Проектування відцентрового насоса за допомогою програмного забезпечення AxSTREAM®. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2022. No. 1. P. 72–77. doi: 10.20998/2411-3441.2022.1.11
- Setyawan E. Y., Djiwo S., Praswanto D. H., Suwandono P., Siagian P., Naibaho W. Simulation model of vertical water wheel performance flow. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 725, no. 1. P. 012020.
- Роговий А., Нескорожений А. Картини течії неньютонівської рідини у вихорокамерних насосах. *Вісник Харківського нац. автомобільно-дорожнього ун-ту*. 2021. Т. 1, вип. 92. С. 125–134.
- Ihmoudah A., Rahman M. A., Butt S. D. CFD and experimental studies of yield power-law fluids in turbulent pipe flow. *Proc. of the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Vol. 8: Polar and Arctic Sciences and Technology; Petroleum Technology (17–22 June 2018, Madrid, Spain)*. 2018. P. OMAE2018-77996, V008T11A012, 10 p. doi: 10.1115/OMAE2018-77996
- ANSYS, C. R22. *1 Help manual*. ANSYS Inc. 2022.
- Svoboda D., Borshchev I., Zharkovskii A., Tvanov E., Klyuyev A. CFD computation of flow in the flow path of a torque flow pump. *In E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 207. P. 04005.
- Huang S., Wei Y., Guo C., Kang W. Numerical Simulation and Performance Prediction of Centrifugal Pump's Full Flow Field Based on OpenFOAM. *Processes*. 2019. Vol. 7 (9). P. 605.

#### References (transliterated)

- Kondus V. Y., Gusak O. G., Yevtushenko J. V. Investigation of the operating process of a high-pressure centrifugal pump with taking into account of improvement the process of fluid flowing in its flowing part. *In Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1741, no. 1, p. 012012.
- Gusak A., Demchenko O., Kaplun I. Application of small-sized low speed axial stages in well pumps for water supply. *Procedia Engineering*. 2012, vol. 39, pp. 35–42.
- Tkach P., Yashchenko A., Gusak O., Khovanskyy S., Panchenko V., Grechka I. Improvement of cavitation erosion characteristics of the centrifugal inducer stage with the inducer bush. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, vol. 4 (8), pp. 24–31.
- Occari M., Mazzanti V., Mollica F., Munari E., Pinelli M., Suman A. Numerical Simulations of a Centrifugal Pump With a Non-Newtonian Fluid: Influence on Performances of Different Rheological Modelling. *Proc. of the ASME-JSME-KSME 2019 8th Joint Fluids Engineering Conference. Vol. 2: Computational Fluid Dynamics (28 July–1 August 2019, San Francisco, California, USA)*. 2019, pp. AJKFluids2019-4940, V002T02A016, 13 p. doi: 10.1115/AJKFluids2019-4940
- Graham L. J., Pullum L., Slatter P., Sery G., Rudman M. Centrifugal pump performance calculation for homogeneous suspensions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2009, vol. 87 (4), pp. 526–533.
- 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.
7. Nabwey H. A., Rahbar F., Armaghani T., Rashad A. M., Chamkha A. J. A Comprehensive Review of Non-Newtonian Nanofluid Heat Transfer. *Symmetry*. 2023, vol. 15 (2), p. 362.
  8. Rogovyi A., Chernetska-Biletska N., Miroshnykova M., Baranov I., Polupan Y. Improvement of cleaning parameters of pipeline elements based on simulation of movement of solid magnetite particles in electrically conductive liquid. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023, vol. 1, no. 5 (121), pp. 38–46.
  9. Fester V. G., Kazadi D. M., Mbiya B. M., Slatter P. T. Loss coefficients for flow of Newtonian and non-Newtonian fluids through diaphragm valves. *Chemical Engineering Research and Design*. 2007, vol. 85 (9), pp. 1314–1324.
  10. Rogovyi A. S., Lukianets S. I. Kinematychni parametry techiei nafty u vykhorokamernomu nasosi [Kinematic parameters of the oil flow in a vortex chamber pump]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2022, no. 1, pp. 59–65. doi: 10.20998/2411-3441.2022.1.09
  11. Rogovyi A. S. *Vykorystannya metodiv chyslovoho vyrishennya zadach inzhenernoho analizu* [Using of numerical solution methods of engineering analysis problems]. Kharkiv, KhNADU, 2019. 112 p.
  12. Donmez M., Yemenici O. A numerical study on centrifugal pump performance with the influence of non-Newtonian fluids. *International Journal Sciences*. 2019, vol. 8, pp. 39–45.
  13. Buratto C., Occari M., Aldi N., Casari N., Pinelli M., Spina P. R., Suman A. Centrifugal pumps performance estimation with non-Newtonian fluids: review and critical analysis. In *Proc. of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics*. 2017, pp. ETC2017-248.
  14. Usman I. U., Abbas K., Abubakar A. M., Mönning R., Abdul A. Z., Alhodali M. A. J. ANSYS-CFX Simulation and Experimental Studies on Centrifugal Pump Impeller Design: Performance Effects Using Corrosive and Non-corrosive Resources. *International Journal of Engineering and Applied Physics*. 2023, vol. 3 (2), pp. 765–779.
  15. Shevchenko N. H., Ivashchenko V. Yu., Rublevs'kyi Ye. Yu., Zakora O. O. Proektuvannya vidtsentrovoho nasosa za dopomohoyu prohramnoho zabezpechennya AxSTREAM® [Centrifugal pump design using AxSTREAM® software]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2022, no. 1, pp. 72–77. doi: 10.20998/2411-3441.2022.1.11
  16. Setyawan E. Y., Djiwo S., Praswanto D. H., Suwandono P., Siagian P., Naibaho W. Simulation model of vertical water wheel performance flow. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 725, no. 1, p. 012020.
  17. Rogovyi A., Neskorozenyi A. Kartyny techiei nen'yutonivs'koyi ridyny u vykhorokamernykh nasosakh [Flow fields of a non-Newtonian fluid in vortex chamber pumps]. *Visnyk Kharkivsk'oho nats. avtomobil'no-dorozhn'oho un-tu* [Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University]. 2021, vol. 1, issue 92, pp. 125–134.
  18. Ihmoudah A., Rahman M. A., Butt S. D. CFD and experimental studies of yield power-law fluids in turbulent pipe flow. *Proc. of the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Vol. 8: Polar and Arctic Sciences and Technology; Petroleum Technology (17–22 June 2018, Madrid, Spain)*. 2018, pp. OMAE2018-77996, V008T11A012, 10 p. doi: 10.1115/OMAE2018-77996
  19. ANSYS, C. R22. 1 Help manual. ANSYS Inc. 2022.
  20. Svoboda D., Borshchev I., Zharkovskii A., Tvanov E., Klyuyev A. CFD computation of flow in the flow path of a torque flow pump. In *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 207, p. 04005.
  21. Huang S., Wei Y., Guo C., Kang W. Numerical Simulation and Performance Prediction of Centrifugal Pump's Full Flow Field Based on OpenFOAM. *Processes*. 2019, vol. 7 (9), p. 605.

Надійшло (received) 18.06.2023

#### 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](mailto:asrogovoy@ukr.net)

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

**Лук'янець Сергій Ігорович (Lukianets Serhiy)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5719-2598>; e-mail: [serhii.lukianets@mit.khpi.edu.ua](mailto:serhii.lukianets@mit.khpi.edu.ua)

**Нескорозжений Артем Олегович (Neskorozenyi Artem)** – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, аспірант кафедри «Деталі машин і теорії механізмів і машин»; м. Харків, Україна; e-mail: [nao@m-impex.com.ua](mailto:nao@m-impex.com.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](mailto:denys.lebedynets@mit.khpi.edu.ua)