

A. С. РОГОВИЙ, С. І. ЛУК'ЯНЕЦЬ, А. О. НЕСКОРОЖЕНИЙ, О. Л. ШУДРИК, П. В. ТОЛСТИЙ

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХОРОКАМЕРНИХ НАСОСІВ ПІД ЧАС ПЕРЕКАЧУВАННЯ НАФТИ З ЗА РІЗНОГО ТИСКУ ВСМОКТУВАННЯ

Покращення ефективності перекачування нафти є актуальною та складною задачею внаслідок значної розмаїтості складу, фізичних властивостей та домішок, що можуть потрапляти в нафту. Серед засобів транспортування нафти поширення отримують струминні насоси та технології. Струминні машини та апарати мають високі показники надійності внаслідок відсутності рухомих органів за низької ефективності, що пов'язане з передачею енергії між струменями, а вихорокамерні нагнітачі виділяються серед інших насосів струминного типу поєднанням позитивних якостей відцентрових та струминних насосів. Метою роботи є визначення характеристик вихорокамерних насосів (ВКН) під час перекачування нафти за різних умов всмоктування нафти. Дослідження проведено числовим шляхом вирішенням осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса. Аналіз чутливості результатів розрахунку проведено для трьох сіток за використання моделі турбулентності Shear Stress Transport (SST). Вперше на основі аналітичних досліджень отримані залежності зміни основних інтегральних параметрів роботи ВКН від надлишкового тиску в каналі всмоктування. Збільшення надлишкового тиску в каналі всмоктування дозволяє збільшити максимальну витрату всмоктування на 44 %, а відносний ККД – на 14 %. Збільшення тиску у каналах всмоктування зменшує відносний корисний тиск на виході з насоса на 30 %. Відбувається лінійне зменшення відносного корисного тиску на виході з насоса в режимах відсутності статичного тиску на виході. Також, відбувається практично лінійне зростання витрати всмоктування але з більшим кутлом нахилу характеристики, що приводить до збільшення відносного ККД. За збільшення ККД ВКН, у порівнянні з серійним прямооточним струминним насосом, зменшено лінійний габаритний розмір більше ніж в 3 рази.

Ключові слова: вихорокамерний насос, нафта, числовий розрахунок, інтегральні параметри, ефективність, витрата.

A. ROGOVYI, S. LUKIANETS, A. NESKOROZHENYI, O. SHUDRYK, P. TOLSTYI

VORTEX CHAMBER PUMP CHARACTERISTICS DURING OIL PUMPING WITH DIFFERENT SUCTION PRESSURES

Improving the efficiency of oil pumping is an urgent and difficult task due to the significant variety of composition, physical properties and impurities that can enter the oil. Among the means of oil transportation, jet pumps and technologies are gaining popularity. Jet machines and devices have high-reliability indicators due to the absence of moving bodies at low efficiency, which is associated with the energy transfer between jets, and vortex chamber superchargers stand out among other jet-type pumps by combining the positive qualities of centrifugal and jet pumps. The aim of the work is to determine the characteristics of vortex chamber pumps (VCP) during oil pumping with different conditions of oil suction. The study was carried out numerically by solving the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations. The sensitivity analysis of the calculation results was carried out for three grids using the Shear Stress Transport (SST) turbulence model. For the first time, on the basis of analytical studies, the dependences of changes in the main integral parameters of the VCP operation efficiency on the gauge pressure in the suction channel were obtained. Increasing the suction gauge pressure allows to increase the maximum suction flow rate by 44 %, and the maximum relative efficiency by 14 %. Increasing the pressure in the suction channels reduces the relative effective pressure at the pump outlet by 30 %. There is a linear decrease in the relative effective pressure at the pump outlet in the absence of outlet static pressure. Also, there is an almost linear increase in suction flow rate, but with a greater angle of characteristic inclination, which leads to an increase in relative efficiency. Along with an increase in the efficiency of the VKN in comparison with a serial direct-flow jet pump, the linear overall size has been reduced by more than 3 times.

Keywords: vortex chamber pump, numerical calculation, integral parameters, efficiency, flow rate.

Вступ. Покращення ефективності перекачування нафти є актуальною та складною задачею внаслідок значної розмаїтості складу, фізичних властивостей та домішок, що можуть потрапляти в нафту [1]. Тому, ККД насосів менші у порівнянні з їх роботою під час перекачування води [2]. Зі зменшенням ККД класичних насосів актуальним стає пошук та використання нових технологій перекачування на основі струминних машин [3].

Струминні машини та апарати мають високі показники надійності внаслідок відсутності рухомих органів за низької ефективності, що пов'язане з передачею енергії між струменями [4]. Класичні прямооточні струминні насоси мають ККД, який не перевищує 30 % [3], а у більшості промислових випадках використання, ККД не перевищує 10 % [5]. Ерліфти, які часто використовують для транспортування нафти також мають низький ККД [6]. Вихорокамерні нагнітачі мають більш високу ефективність, але досліджень щодо характеристик перекачування нафти ще не проводилося.

Аналіз останніх досліджень. Вихорокамерні нагнітачі (ВКН) винайдені більше 30 років тому, перш

за все, для перекачування твердих середовищ [7]. Для цих середовищ винайдені значно більші, у порівнянні з прямооточними струминними нагнітачами, показники ефективності за рахунок збільшення дії відцентрової сили через значне співвідношення густин. ККД ВКН за перекачування води менший, але у випадках перекачування агресивних середовищ, вібрацій, температур, абразивних частинок довговічність таких насосів може бути важливою [8]. В роботі [9] розглянуто характеристики ВКН для перекачування Бінгамівських неньютонівських рідин з різними показниками в'язкості. Зроблено висновок, що ефективність роботи ВКН знижується зі збільшенням в'язкості, але досліджень за перекачування нафти не проводилося.

В роботі [10] виконане дослідження поведінки ВКН під час перекачування нафти з газом та сумісного вирішення рівнянь Рейнольдса та Релея-Плессета. Але, в цій роботі не визначалися й не досліджувалися загальні характеристики ВКН, що важливе для використання їх у промисловості.

Загалом, струминні насоси є затребуваними у нафтогазовій галузі, тому зі збільшенням ККД, ВКН

можуть їх замінити за збереження показників надійності та довговічності [11].

Сучасні дослідження течії у струминних насосах включають числове моделювання на основі вирішення рівнянь Нав'є-Стокса осереднених за Рейнольдсом з використанням тієї або іншої моделі турбулентності. Такий підхід є цілком прийнятним за попередньої верифікації та валідації течії, що проведено в роботах [8, 12]. Основні параметри роботи насоса, розраховані таким чином, є адекватними та помилка розрахунку прийнятна не лише за інтегральними характеристиками, але й за розподілами тиску у вихровій камері.

Мета. Метою роботи є визначення характеристик вихорокамерних насосів під час перекачування нафти за різних умов всмоктування нафти.

Результати досліджень. ВКН складається з вихрової камери та чотирьох каналів входу та виходу (рис. 1): два осьові канали всмоктування та два тангенціальні канали входу й виходу. Робочий процес базується на поєднанні позитивних якостей струминного та відцентрового насоса. Відцентрова сила дозволяє розраховувати на збільшення ККД струминного насоса зі збільшенням гідравлічної енергії вихідного потоку.

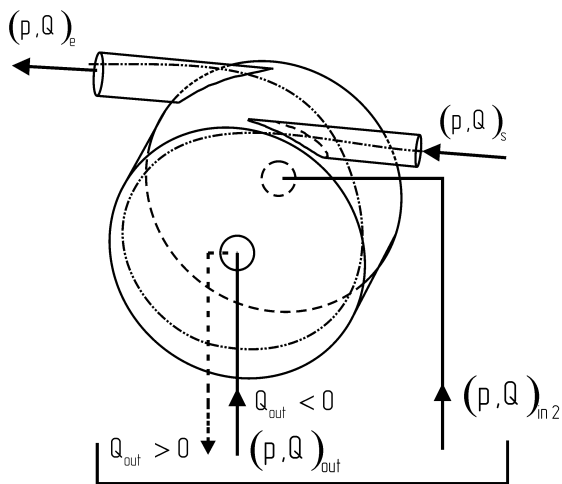


Рис. 1. Вихорокамерний насос

В роботі розрахунок характеристики виконано за умовами фізичного експерименту, тобто зі збільшенням тиску на виході з насоса шляхом коригування витрати. За таких умов тиск на виході з насоса може перевищити значення, за якого частина витрати живлення може потрапляти в один з осьових каналів входу в насос, й перетворювати такий канал на дренажний. В такому випадку, визначається значна зміна в розподілі тиску вздовж вісі насоса зі зростанням тиску на виході. Для перекачування нафти такий режим роботи не є доцільним внаслідок значного зниження витрати у вихідному тангенціальному каналі. Такий режим корисний для перекачування твердого середовища.

Дослідження проведено в програмному середовищі Ansys CFX за використання студентської ліцензії [13]. Аналіз чутливості результатів розрахунку проведено для трьох сіток: 100, 300 та

500 тис. елементів [14]. Визначено, що раціональним є використання сіткового розбиття 500 тис. елементів, що дозволяє збільшити кількість елементів у прикордонному шарі для використання моделі турбулентності SST [15]. Хоча, результати визначення інтегральних характеристик не залежали від кількості елементів, починаючи з 300 тис. Математична модель наведена у [8, 16]. Для більш якісного визначення вакууму біля осі обертання використано виправлення на кривизну ліній струму та обертання потоку [16]. Розрахунок виконано у стаціонарній постановці й виконувався до досягнення нев'язань усіх рівнянь значень 10^{-5} за сталості витрат всмоктування у насос та на виході з насоса, що є стандартним для вихрових пристроїв [17–19].

В якості граничних умов задавалися: повний тиск на вході у тангенціальний канал живлення, відкрита умова зі статичним тиском у каналах всмоктування для ефективного реалізації можливості входу та виходу потоку через ці канали. Значення тиску варіювалося під час дослідження. У вихідному тангенціальному каналі задавався статичний тиск різного значення, що дозволяло отримати характеристику насоса. Фізичні властивості нафти: густина $\rho = 850 \text{ кг/м}^3$, динамічна в'язкість $\mu = 0,004 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Основні геометричні розміри ВКН: діаметр вихрової камери 50 мм, відносні до діаметра горла вихрової камери діаметри тангенціальних каналів входу – 0,86 та виходу – 1,14. Таким чином, в даному насосі реалізовано робочий режим із всмоктуванням нафти через обидва осьові канали [8].

Для визначення впливу тиску у каналі всмоктування дослідження проведено для п'яти різних тисків: 96 кПа, 80 кПа, 60 кПа, 30 кПа та 0 у відношенні до тиску в каналі живлення характеристики з $p_{in} = 96 \text{ кПа}$ та $p_e = 0$: 0,27; 0,23; 0,18; 0,094 та 0 відповідно.

Аналіз максимальних витрат, що всмоктується насосом показує, що зі збільшенням тиску в каналі всмоктування, збільшується й витрата. Це можна бачити на рис. 2, на якому представлені характеристики ВКН. Збільшення надлишкового тиску в каналі всмоктування до $0,27p_s$ дозволяє збільшити максимальну витрату всмоктування на 44 %.

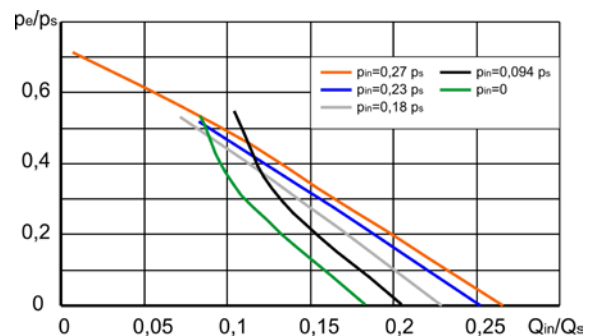


Рис. 2. Характеристики ВКН за різного тиску в каналі всмоктування

Збільшення відносної витрати всмоктування не дозволяє отримати збільшення ефективності роботи

насоса (рис. 3) внаслідок зниження тиску на виході (рис. 4). Ефективність насоса визначалася за ККД насоса:

$$\eta = \frac{p_e - p_{in} + \frac{\rho}{2}(V_e^2 - V_{in}^2)}{p_s - p_e + \frac{\rho}{2}(V_s^2 - V_e^2)} \cdot \frac{Q_{in}}{Q_s} \quad (1)$$

На рис. 3 ККД насоса віднесено до максимального ККД характеристики з $0,27p_s$ та $Q_{in}/Q_s = 0,265$. Збільшення надлишкового тиску в каналі всмоктування до $0,27p_s$ дозволяє збільшити відносний ККД на 14 %.

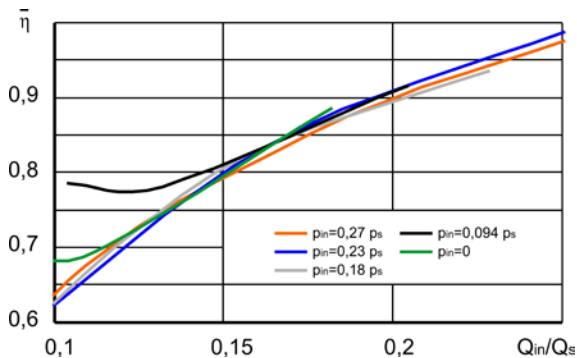


Рис. 3. Залежність відносного ККД від відносної витрати всмоктування у насос

Збільшення тиску у каналах всмоктування зменшує відносний корисний тиск на виході з насоса на 30 %, що можна бачити на рис. 4, якщо аналізувати початок ліній за максимальної витрати всмоктування. Відносний корисний тиск розраховано шляхом відношення корисного тиску до робочого за загальними для струминних насосів формулами (2), (3).

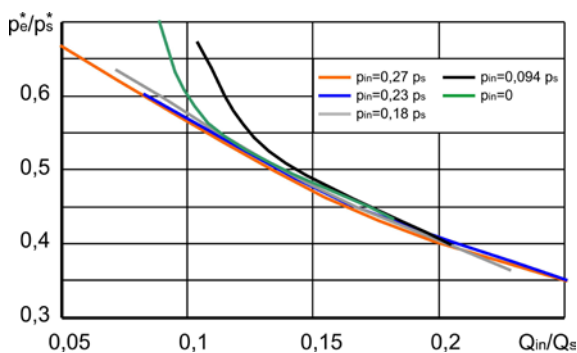


Рис. 4. Залежність відносного корисного тиску на виході з насоса від відносної витрати всмоктування у насос

Корисний тиск:

$$p_e^* = p_e - p_{in} + \frac{\rho}{2}(V_e^2 - V_{in}^2) \quad (2)$$

Робочий тиск:

$$p_s^* = p_s - p_e + \frac{\rho}{2}(V_s^2 - V_e^2) \quad (3)$$

Зменшення відносного корисного тиску на виході зменшує ефективність перекачування. Але, згідно з

рис. 3 та 4 можна бачити, що в зоні порівняно малих витрат всмоктування відбувається збільшення ККД та відносного тиску для варіантів перекачування без використання надлишкового тиску в каналі всмоктування.

Загальна інформація щодо впливу збільшення надлишкового тиску в каналі всмоктування наведена на рис. 5. Відбувається лінійне зменшення відносного корисного тиску на виході з насоса в режимах відсутності статичного тиску на виході. Також, відбувається практично лінійне зростання витрати всмоктування, але з більшим кутом нахилу характеристики, що приводить до збільшення відносного ККД.

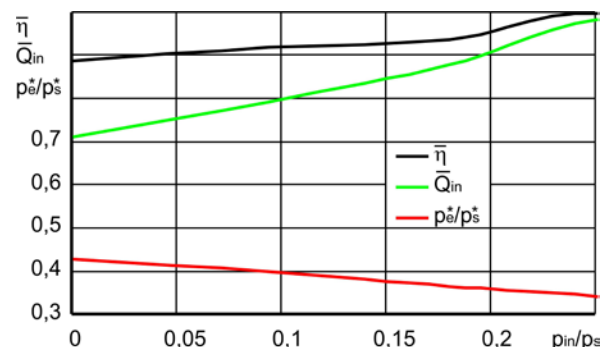


Рис. 5. Вплив надлишкового тиску в каналі всмоктування на інтегральні характеристики ВКН

ККД серійного промислового насоса прямого струминного типу НСФБ 39/45 приблизно 3 %. Отриманий ККД вихорокамерного насоса більше ніж в 2,5 рази перевищує ККД НСФБ 39/45, крім того, внаслідок використання вихрової камери, загальний габаритний розмір насоса зменшено більше ніж в 3 рази.

Висновки. Числовим шляхом за рахунок вирішення рівнянь Нав'є-Стокса осереднених за Рейнольдсом визначено характеристики вихорокамерних насосів під час перекачування нафти за різних надлишкових тисків в каналах усмоктування.

Вперше на основі аналітичних досліджень отримані залежності зміни основних інтегральних параметрів ефективності роботи ВКН від надлишкового тиску в каналі всмоктування.

Збільшення надлишкового тиску в каналі всмоктування до $0,27p_s$ дозволяє збільшити максимальну витрату всмоктування на 44 %. Збільшення надлишкового тиску в каналі всмоктування до $0,27p_s$ дозволяє збільшити максимальний відносний ККД на 14 %. Збільшення тиску в каналах всмоктування зменшує відносний корисний тиск на виході з насоса на 30 %.

Під час збільшення тиску всмоктування відбувається лінійне зменшення відносного корисного тиску на виході з насоса в режимах відсутності статичного тиску на виході. Також, відбувається практично лінійне зростання витрати всмоктування, але з більшим кутом нахилу характеристики, що приводить до збільшення відносного ККД.

Зі збільшенням ККД ВКН, у порівнянні з

серійним прямооточним струминним насосом, зменшено лінійний габаритний розмір більше ніж в 3 рази.

Applied energy. 2017. Vol. 207. P. 195–207. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.119

Список літератури

1. Ляпощенко О. О., Моїсєєв В. Ф., Старинський О. С., Сейф Х. Оптимізація розділюючого обладнання установки атмосферної переробки вуглеводневої сировини. *Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво. Зб. наук. пр. VI міжнародної науково-практичної конференції (23–25 листопада 2022 р., Шостка)*. Суми: СумДУ, 2022. С. 85–88.
2. Liu Y., Cheng Q., Gan Y., Wang Y., Li Z., Zhao J. Multi-objective optimization of energy consumption in crude oil pipeline transportation system operation based on exergy loss analysis. *Neurocomputing*. 2019. Vol. 332. P. 100–110.
3. Соколов Е. Я., Зингер Н. М. *Струйные аппараты*. Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
4. Melentiev R., Fang F. Recent advances and challenges of abrasive jet machining. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2018. Vol. 22. P. 1–20.
5. Panevnyk D. Simulation of a downhole jet-vortex pump's working process. *Nafta-Gaz*. 2021. Vol. 77 (9). P. 579–586.
6. IGNB Catrawedarma, Deendarlianto, Indarto. The performance of airlift pump for the solid particles lifting during the transportation of gas-liquid-solid three-phase flow: A comprehensive research review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 235, issue 2. P. 606–628. doi: 10.1177/09544089209517
7. Beck J. L. Patent 444862, United States. *Vortex injection method and apparatus*. 1984.
8. Сьомін Д. О., Роговий А. С. *Вихорокамерні нагнітачі: монографія*. Харків: ФОП Мезина В. В., 2017. 204 с.
9. Rogovyi A., Korohodskiy V., Medvediev Y. Influence of Bingham fluid viscosity on energy performances of a vortex chamber pump. *Energy*. 2021. Vol. 218. P. 119432. doi: 10.1016/j.energy.2020.119432
10. 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
11. Якимечко Я. Я. Використання пульсаційно-хвильової технології для інтенсифікації видобування високов'язких нафт. *Збірник статей учасників дев'ятого всукраїнської практично-пізнавальної інтернет-конференції «Наукова думка сучасності і майбутнього» (27 березня–11 квітня 2018 р., Дніпро)*. Дніпро: Вид-во НМ, 2018. С. 19–21.
12. Stephens D. W., Mohanaragam K. Turbulence model analysis of flow inside a hydrocyclone. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*. 2010. Vol. 10, issue 5–6. P. 366–373.
13. ANSYS, C. R22. *1 Help manual*. ANSYS Inc. 2022.
14. Besagni G., Inzoli F. Computational fluid-dynamics modeling of supersonic ejectors: Screening of turbulence modeling approaches. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 117. P. 122–144.
15. Shur M. L., Strelets M. K., Travin A. K., Spalart P. R. Turbulence modeling in rotating and curved channels: assessing the Spalart-Shur correction. *AIAA journal*. 2000. Vol. 38, no. 5. P. 784–792. doi: 10.2514/2.1058
16. Smirnov P. E., Menter F. R. Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart-Shur correction term. *Journal of Turbomachinery*. 2009. Vol. 131, issue 4. P. 1–8. doi: 10.1115/1.3070573
17. Alahmadi Y. H., Nowakowski A. F. Modified shear stress transport model with curvature correction for the prediction of swirling flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*. 2016. Vol. 147. P. 150–165. doi: 10.1016/j.ces.2016.03.023
18. Markovich D. M., Abdurakipov S. S., Chikishev L. M., Dulin V. M., Hanjalić K. Comparative analysis of low-and high-swirl confined flames and jets by proper orthogonal and dynamic mode decompositions. *Physics of Fluids*. 2014. Vol. 26 (6). P. 065109. doi: 10.1063/1.4884915
19. Valera-Medina A., Viguera-Zuniga M. O., Baej H., Syred N., Chong C. T., Bowen P. J. Outlet geometrical impacts on blowoff effects when using various syngas mixtures in swirling flows. *Applied energy*. 2017. Vol. 207. P. 195–207. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.119
20. Liaposhchenko O. O., Moisieiev V. F., Starynskiy O. Ye., Seif Kh. Optymizatsiia rozdiliuuchoho obladnannia ustanovky atmosfernoi pererobky vuhlevodnevoi syrovyny [Optimization of the separation equipment of the atmospheric processing installation of hydrocarbon raw materials]. *Khimichna tekhnolohiia: nauka, ekonomika ta vyrobnytstvo. Zb. nauk. pr. VI mizhmarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (23–25 lystopada 2022 r., Shostka)* [Chemical technology: science, economy and production. Collection of research papers of the 6th Int. Research and Practical Conf. (23–25 November 2022, Shostka)]. Sumy, SumDU Publ., 2022, pp. 85–88.
21. Liu Y., Cheng Q., Gan Y., Wang Y., Li Z., Zhao J. Multi-objective optimization of energy consumption in crude oil pipeline transportation system operation based on exergy loss analysis. *Neurocomputing*. 2019, vol. 332, pp. 100–110.
22. Sokolov E. Ya., Zinger N. M. *Struynye apparaty* [Jet devices]. Energoatomizdat Publ., 1989. 352 p.
23. Melentiev R., Fang F. Recent advances and challenges of abrasive jet machining. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2018, vol. 22, pp. 1–20.
24. Panevnyk D. Simulation of a downhole jet-vortex pump's working process. *Nafta-Gaz*. 2021, vol. 77 (9), pp. 579–586.
25. IGNB Catrawedarma, Deendarlianto, Indarto. The performance of airlift pump for the solid particles lifting during the transportation of gas-liquid-solid three-phase flow: A comprehensive research review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2021, vol. 235, issue 2, pp. 606–628. doi: 10.1177/09544089209517
26. Beck J. L. *Vortex injection method and apparatus*. Patent U. S., no. 444862, 1984.
27. Syomin D. O., Rogovyi A. S. *Vykhoro kamerni nahnitachi: monohrafiya* [Vortex chamber superchargers]. Kharkiv, FOP Mezhina V. V. Publ., 2017. 204 p.
28. Rogovyi A., Korohodskiy V., Medvediev Y. Influence of Bingham fluid viscosity on energy performances of a vortex chamber pump. *Energy*. 2021, vol. 218, p. 119432. doi: 10.1016/j.energy.2020.119432
29. Rogovyi A. S., Lukianets S. I. Kinematychni parametry techii nafty u vykhoro kamernomu 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
30. Yakymechko Ya. Ya. Vykorystannya pul'satsiyno-khvylovoyi tekhnolohiyi dlya intensyfikatsiyi vydobuvannya vysokov'язkykh naft [The use of pulsation-wave technology to intensify the production of highly viscous oils]. *Zbiryk statey uchasykyv dev'yatnadcyattoi vseukrayins'koyi praktychno-piznaval'noyi internet-konferentsiyi "Naukova dumka suchasnosti i maybutn'oho" (27 berezhnya–11 kvitnya 2018 r., Dnipro)* [A collection of articles by the participants of the nineteenth All-Ukrainian practical and cognitive Internet conference "Scientific thought of the present and the future" (March 27–April 11, 2018, Dnipro)]. Dnipro, NM Publ., 2018, pp. 19–21.
31. Stephens D. W., Mohanaragam K. Turbulence model analysis of flow inside a hydrocyclone. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*. 2010, vol. 10, issue 5–6, pp. 366–373.
32. ANSYS, C. R22. *1 Help manual*. ANSYS Inc. 2022.
33. Besagni G., Inzoli F. Computational fluid-dynamics modeling of supersonic ejectors: Screening of turbulence modeling approaches. *Applied Thermal Engineering*. 2016, vol. 117, pp. 122–144.
34. Shur M. L., Strelets M. K., Travin A. K., Spalart P. R. Turbulence modeling in rotating and curved channels: assessing the Spalart-Shur correction. *AIAA journal*. 2000, vol. 38, no. 5, pp. 784–792. doi: 10.2514/2.1058
35. Smirnov P. E., Menter F. R. Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart-Shur correction term. *Journal of Turbomachinery*. 2009, vol. 131, issue 4, pp. 1–8. doi: 10.1115/1.3070573
36. Alahmadi Y. H., Nowakowski A. F. Modified shear stress transport model with curvature correction for the prediction of swirling flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*. 2016, vol. 147, pp. 150–165. doi: 10.1016/j.ces.2016.03.023
37. Markovich D. M., Abdurakipov S. S., Chikishev L. M., Dulin V. M., Hanjalić K. Comparative analysis of low-and high-swirl confined flames and jets by proper orthogonal and dynamic mode decompositions. *Physics of Fluids*. 2014, vol. 26 (6), P. 065109. doi: 10.1063/1.4884915
38. Valera-Medina A., Viguera-Zuniga M. O., Baej H., Syred N., Chong C. T., Bowen P. J. Outlet geometrical impacts on blowoff effects when using various syngas mixtures in swirling flows. *Applied energy*. 2017. Vol. 207. P. 195–207. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.119

References (transliterated)

- model with curvature correction for the prediction of swirling flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*. 2016, vol. 147, pp. 150–165. doi: 10.1016/j.ces.2016.03.023
18. Markovich D. M., Abdurakipov S. S., Chikishev L. M., Dulin V. M., Hanjalić K. Comparative analysis of low-and high-swirl confined flames and jets by proper orthogonal and dynamic mode decompositions. *Physics of Fluids*. 2014, vol. 26 (6), p. 065109. doi: 10.1063/1.4884915
19. Valera-Medina A., Viguera-Zuniga M. O., Baej H., Syred N., Chong C. T., Bowen P. J. Outlet geometrical impacts on blowoff effects when using various syngas mixtures in swirling flows. *Applied energy*. 2017, vol. 207, pp. 195–207. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.119

Надійшла (received) 18.12.2022

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

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

Нескорожений Артем Олегович (Neskorozhenyi Artem) – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, аспірант кафедри «Деталей машин і теорії механізмів і машин»; м. Харків, Україна; e-mail: nao@m-impex.com.ua

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

Толстий Павло Вячеславович (Tolsty Pavlo) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; e-mail: pavlo.tolsty@emmb.khpi.edu.ua