



МАШИНОБУДУВАННЯ (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЯМИ)

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-9>

УДК 621.6

С. С. Антоненко¹, канд. техн. наук

ORCID: 0009-0002-7490-2691

Е. В. Колісніченко¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-6259-4049

В. Ю. Кондусь¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-3116-7455

О. В. Ратушний¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3525-0953

О. С. Ковязін², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3027-872X

¹ Сумський державний університет² Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: ed.kolisnichenko@pgm.sumdu.edu.ua

**ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ НАСОСА З ВІДЦЕНТРОВО-ВИХРОВИМ
СТУПЕНЕМ ПОРІВНЯНО З НАСОСОМ ТИПУ ЕВН**

Анотація. Розвиток галузі насособудування супроводжується пошуком шляхів удосконалення технологій, методів проектування й виготовлення насосного обладнання з метою підвищення його ефективності. Сучасні вимоги до насосних систем диктують необхідність створення агрегатів, здатних стабільно працювати в широкому діапазоні подач і напорів, адаптуючись до змінних умов експлуатації та властивостей перекачуваного середовища. Особливу складність становить транспортування високов'язких рідин, що потребує нових конструктивних рішень.

У роботі проведено експериментальні дослідження гідравлічних характеристик насоса з відцентрово-вихровим ступенем при різних частотах обертання робочого органу. На основі отриманих даних побудовано робочі характеристики, здійснено порівняльний аналіз енергоефективності й проведено зіставлення з електровідцентровими насосами (далі – ЕВН). Визначено оптимальні режими функціонування й окреслено перспективні ділянки застосування насосів із відцентрово-вихровими (далі – ВВ) ступенями для роботи з високов'язкими середовищами.

Ключові слова: насос, робоче колесо, ступінь, подача, напір, потужність, ККД, енергоефективність.

Постановка проблеми. У складі сучасних гідравлічних систем для транспортування високов'язких середовищ переважно застосовується насосне обладнання, що функціонує на основі гідродинамічного принципу дії [1–4]. Згідно з класифікацією лопатевих насосів, ефективна робота їх проточної частини визначається коефіцієнтом швидкохідності (n_s), який зазвичай знаходиться в межах $35 \leq n_s \leq 1200$. Зона низьких значень n_s характерна для насосів об'ємного типу – поршневих, гвинтових тощо [5].

Незважаючи на здатність об'ємних насосів працювати з високов'язкими рідинами, їхня висока вартість, обмежена надійність, особливо при роботі з гідросумішами, часто не відповідають вимогам експлуатаційних організацій. Лопатеві насоси, навпаки, демонструють кращу адаптацію до перекачування багатofазних середовищ, не маючи притаманних об'ємним насосам недоліків [6].

У реальних умовах рідини, що перекачуються, рідко є гомогенними: вони часто містять тверді частинки, газові включення або їх комбінацію, що формує дво- або трифазні середовища. При роботі традиційних відцентрових насосів з такими гідросумішами виникає ризик перекриття, забивання прохідних каналів проточної частини, що спричиняє зрив робочих параметрів і, як наслідок, економічні втрати.

Для надійної роботи насосних систем у середовищі багатофазних потоків необхідно використовувати спеціалізовані лопатеві агрегати, які стійко функціонують навіть за умов зміни складу перекачуваної рідини. Такі машини повинні бути малочутливими до наявності газових бульбашок, дрібних твердих включень чи коливань фізико-хімічних властивостей середовища. Саме відцентрово-вихрові насоси відповідають цим вимогам, конструкція яких поєднує переваги відцентрових і вихрових ступенів.

Аналіз останніх досліджень. Відцентрово-вихрові насоси [6–10] широко застосовуються у водопостачанні, харчовій і нафтовій промисловості завдяки поєднанню переваг відцентрових і вихрових машин. Їхня конструкція включає два ступені – відцентровий і вихровий, що забезпечує високий напір, значну висоту всмоктування та здатність до самовсмоктування. Такі агрегати можуть працювати без попереднього заповнення всмоктувального трубопроводу й установлюватися вище за рівень рідини. При цьому вихрове колесо виконує функцію високонапірного ступеня, а відцентрове забезпечує безкавітаційну роботу системи. Попри це, указані насоси мають певні недоліки: знижену експлуатаційну надійність через несиметричний розподіл тиску, що викликає прогин валу та перекіс колеса; значні габарити й підвищену металомісткість через суміжне розташування коліс; а також великі осьові сили, спричинені зовнішніми вихровими каналами, які створюють додаткове навантаження та призводять до швидкого зношування підпірних шайб.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Мета статті полягає в дослідженні гідравлічних характеристик насоса з відцентрово-вихровим ступенем при різних частотах обертання робочого колеса (далі – РК), визначенні оптимальних режимів його функціонування й оцінці енергоефективності порівняно з насосами типу ЕВН. Робота спрямована на обґрунтування перспективних напрямів застосування таких насосів для транспортування високов'язких рідин і пошук конструктивних рішень, що забезпечують стабільну роботу агрегатів у змінних умовах експлуатації.

Основна частина. Позбавитися недоліків традиційних відцентрово-вихрових насосів вдається використанням комбінованого ВВ ступеня (рис. 1), який поєднує переваги традиційних конструкцій, водночас усуваючи їхні основні недоліки – масогабаритні показники, значні осьові навантаження та недостатню експлуатаційну надійність.

Характерною особливістю цього ступеня є наявність додаткових вихрових каналів, розміщених на протилежному боці від основних проточних каналів РК, виконаних на передньому

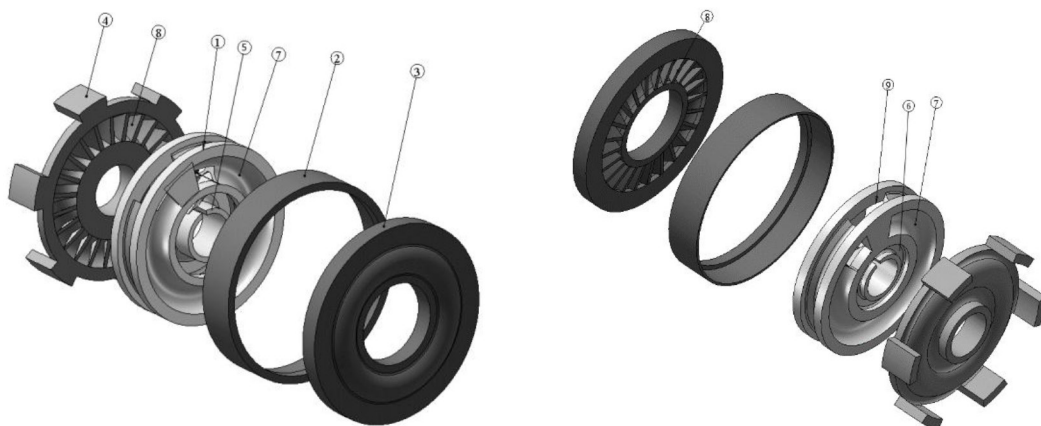


Рис. 1. Елементи ВВ ступеня:

1 – РК; 2 – корпус РК; 3 – передній вихровий диск; 4 – задній вихровий диск; 5 – всмоктувальна частина РК; 6 – лопать РК; 7 – кільцеві канали; 8 – лопатки вихрових дисків; 9 – перевідний радіальний канал

й задньому дисках. Кожен вихровий канал являє собою заглиблення з увігнутим дном, сформоване по дугоподібній траєкторії, яка на стороні, що контактує з потоком, переходить у прямолінійну площину. РК має однолопатеву конструкцію та поєднує в собі кільцеві й радіальні канали.

За конструктивними ознаками цей ступінь належить до малогабаритних робочих елементів динамічних насосів.

Експериментальні дослідження виконувалися при частотах обертання 1000, 2000 та 3000 об/хв.

Для оцінки енергетичних характеристик насоса з ВВ ступенем використовувалися безрозмірні коефіцієнти напору (ψ), витрати (φ), потужності (μ) та ККД (η) [6]:

$$\psi = \frac{2gH}{U_2^2}; \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{4Q}{\pi D_2^2 U_2}; \quad (2)$$

$$\mu = \frac{8N}{\rho \pi D_2^2 U_2^3 \eta}, \quad (3)$$

де g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

H – напір насоса, м;

U_2 – колова швидкість на виході з робочого колеса, м/с;

Q – витрата насоса, $\text{м}^3/\text{с}$;

D_2 – зовнішній діаметр робочого колеса, м;

N – потужність насоса, Вт;

ρ – густина рідини, що перекачується, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Енергетичні показники досліджуваного насоса з частотою обертання $n=3000$ об/хв представлено на рис. 2.

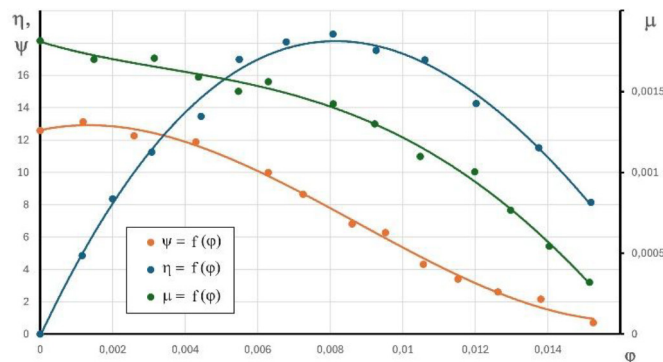


Рис. 2. Енергетичні показники досліджуваного насоса з частотою обертання $n = 3000$ об/хв

Первинний аналіз отриманих експериментальних характеристик, представлених у графічному вигляді залежностей $\psi = f(\varphi)$; $\eta = f(\varphi)$; $\mu = f(\varphi)$, засвідчив стрімке падіння напору та споживаної потужності зі збільшенням витрати. Як видно з рис. 2, ВВ ступінь забезпечує досить високий напір при досить невеликій витраті, що перекачується. Однак при цьому демонструє досить низьке значення коефіцієнта корисної дії (далі – ККД).

На оптимальному режимі роботи ККД не перевищує 18 %. Основними причинами такої низької енергоефективності є:

- значні об'ємні втрати, зумовлені торцевими зазорами, які мають суттєвий вплив порівняно з витратою;

- гідравлічні втрати, що виникають через відсутність елементів, які переводять потік з осьового напрямку в радіальний;
- додаткові втрати в зоні вихрових каналів передньої та задньої частин ступеня.

На основі досліджень визначено безрозмірні енергетичні показники досліджуваного насоса в оптимальному режимі роботи (таблиця 1), а також побудовано порівняльні енергетичні характеристики для частот обертання 1000, 2000 та 3000 об/хв (рисунки 3–5).

Таблиця 1

Порівняльні енергетичні показники насоса з ВВ ступенем в оптимальному режимі роботи

n , об/хв	Ψ_0	Φ_0	μ_0	η_0
1000	1,95	0,0075	0,00012	0,12
2000	3,1	0,0081	0,00048	0,14
3000	5,86	0,0086	0,00119	0,18

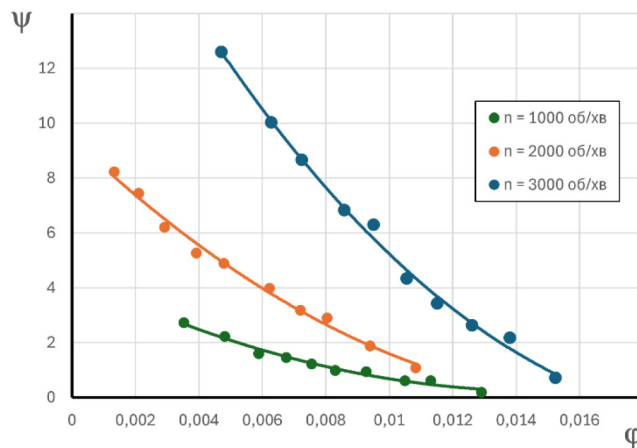


Рис. 3. Аналіз напірних показників насоса з ВВ ступенем на різних частотах обертання

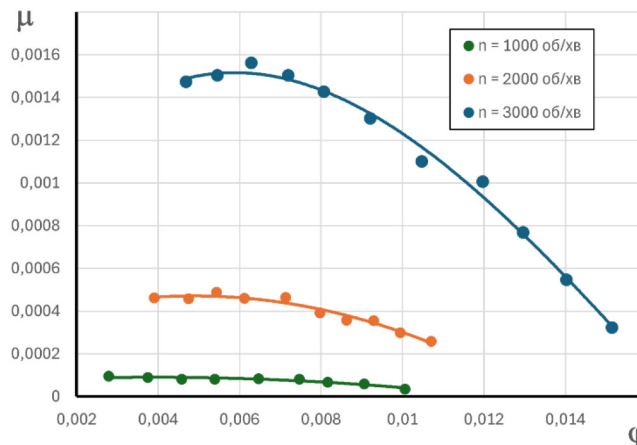


Рис. 4. Аналіз показників потужності насоса з ВВ ступенем на різних частотах обертання

Аналіз порівняльних показників напору, споживаної потужності й ККД (рис. 3–5) свідчить, що всі криві розташовані компактно та мають схожий характер. Найкращі показники спостерігаються при частоті обертання $n = 3000$ об/хв, що значно перевищує результати, отримані при $n = 1000$ об/хв та $n = 2000$ об/хв. Це зумовлено покращенням обтікання проточної частини насоса зі збільшенням частоти обертання, що, своєю чергою, сприяє зменшенню гідравлічних втрат і підвищенню загальної енергоефективності агрегату.

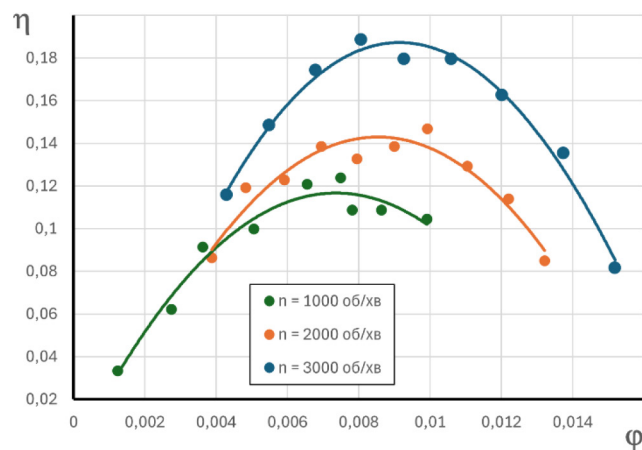


Рис. 5. Аналіз показників ККД насоса з ВВ ступенем на різних частотах обертання

Графічні залежності, представлені на рис. 3–5, демонструють чітку закономірність: зі збільшенням частоти обертання спостерігається зростання основних робочих параметрів насоса. Це підтверджує позитивний вплив частоти обертання на гідравлічні й енергетичні характеристики агрегату.

Отримані результати підтверджують, що підвищення частоти обертання сприяє покращенню обтікання проточної частини, зменшенню гідравлічних втрат і, відповідно, зростанню енергоефективності насосного обладнання.

Для оцінки енергоефективності роботи насосного обладнання також проведено порівняльний аналіз гідравлічних характеристик двох типів насосів, однакових за зовнішнім діаметром робочого колеса: з ВВ ступенем і зі ступенем типу ЕВН [11–13]. Основна увага приділялася таким параметрам, як подача, напір, споживана потужність і ККД в умовах перекачування водяного середовища.

Порівняльні характеристики насоса з ВВ ступенем та ЕВ ступенем на оптимальному режимі при частоті обертання 3000 об/хв представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняльні характеристики насоса з ВВ ступенем та ЕВ ступенем на оптимальному режимі

Вид насосу	ψ_0	φ_0	m_0	η_0
з ВВ ступенем	5,86	0,0086	0,00119	0,18
з ЕВ ступенем	1,6	0,022	0,0075	0,4

Порівняльні енергетичні характеристики насоса з ВВ ступенем і ступенем типу ЕВН (ЕВ), при перекачуванні чистої води при частоті обертання 3000 об/хв, наведено на рис. 6–8.

Порівняльні характеристики (рис. 6–8) дають змогу оцінити переваги й обмеження кожного типу насосного обладнання залежно від умов експлуатації.

Так насос із ВВ ступенем продемонстрував стабільну роботу при низьких витратах, забезпечуючи високий напір, що є перевагою в умовах обмеженого об'єму перекачуваної рідини. Водночас стрімке падіння напору на досить вузькому діапазоні витрат свідчить про значну обмеженість використання таких насосів. Крім того, його енергоефективність залишається на досить низькому рівні, що пояснюється конструктивними особливостями, зокрема наявністю торцевих зазорів, відсутністю перевідного апарату й втратами у вихрових каналах.

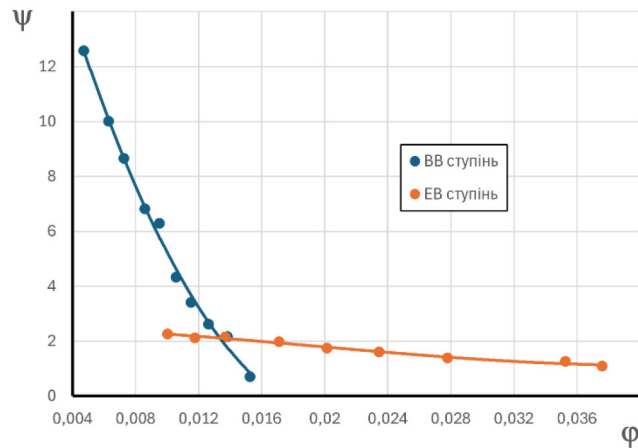


Рис. 6. Порівняльна напірна характеристика насоса з ВВ ступенем і насоса типу ЕВН

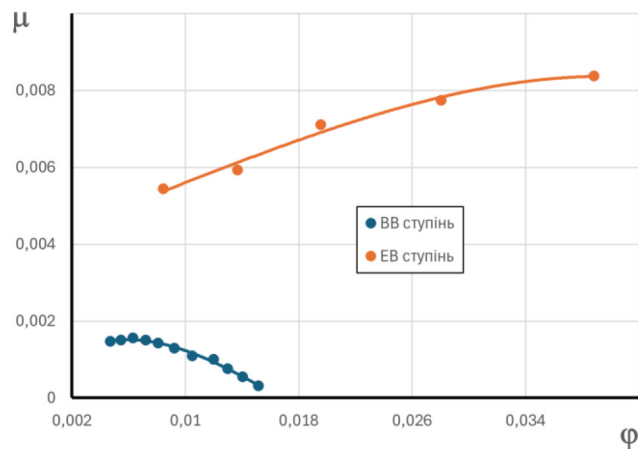


Рис. 7. Порівняльна характеристика потужностей насоса з ВВ ступенем і насоса типу ЕВН

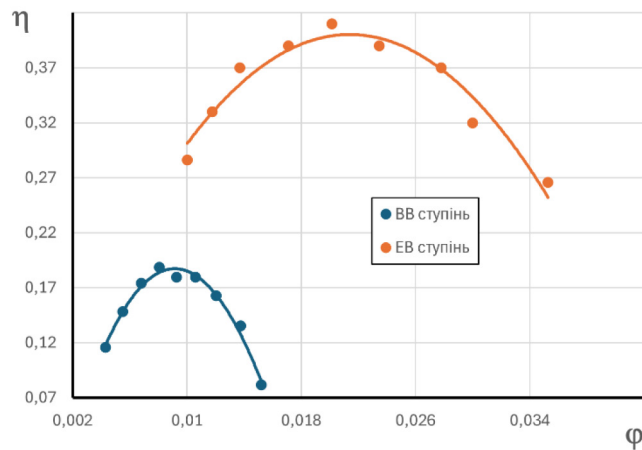


Рис. 8. Порівняльна характеристика ККД насоса з ВВ ступенем і насоса типу ЕВН

Насоси типу ЕВН, навпаки, характеризуються вищим ККД у широкому діапазоні витрат. Більш пологий характер напірної характеристики в широкому діапазоні витрат робить їх більш придатними для систем зі змінними режимами роботи. Вони демонструють кращу енергетичну ефективність, але можуть поступатися у створенні напору при невеликих витратах.

Отримані результати свідчать про доцільність вибору типу насоса залежно від специфіки технологічного процесу: для малих витрат і високого напору – ВВ ступінь; для стабільної роботи з високим ККД – ЕВ ступінь.



Висновки. На основі експериментального дослідження й порівняльного аналізу насосів із ВВ ступенем та ЕВ ступенями можна сформулювати такі висновки:

- насос із ВВ ступенем забезпечує високий напір при малих витратах, що робить його ефективним для застосування в умовах обмеженого об'єму середовища, що перекачується. Однак його ККД залишається низьким через значні об'ємні й гідравлічні втрати, що впливають через конструктивні особливості досліджуваного ступеня. Але треба зазначити, що для систем, де пріоритетом є високий напір при низькій витраті, доцільним убачається використання саме насосів з ВВ ступенем;
- насоси типу ЕВН демонструють вищу енергоефективність у широкому діапазоні витрат, що робить їх більш універсальними для промислових і сільськогосподарських систем з варіативними режимами роботи. Тому у випадках, коли важливо забезпечити стабільну роботу з високим ККД при змінних витратах, рекомендовано застосовувати насосне обладнання з ЕВ ступенями;
- зростання частоти обертання позитивно впливає на гідравлічні характеристики обох типів насосів, зменшуючи втрати й підвищуючи ККД;
- при проектуванні насосних систем варто враховувати не лише гідравлічні параметри, а й особливості перекачуваного середовища (в'язкість, фазовий склад), що суттєво впливають на вибір оптимального типу насоса.

Список використаних джерел

1. Khairul Anuar N. H., Mhd Razali M. N., Mohamad Yasin M. R. M. Abdul Hadi, Abd A. N. Ghaffar, "Study on custom centrifugal pump performance in supplying food based high viscos liquid". *JMMST*. 2021. Vol. 5, № 1. P. 80–88. DOI: 10.15282/jmmst.v5i1.6280
2. Yousefi H., Noorollahi Y., Tahani M., Fahimi R., Saremi S. Numerical simulation for obtaining optimal impeller's blade parameters of a centrifugal pump for high-viscosity fluid pumping. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2019. № 34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.04.011>
3. Mohammedali A. A. M., Omara A. A. M., Mohamed R. H. A., Mohamed H. G. H., Mohamed D. A. A. Performance Assessment of a Centrifugal Pump With Varying Blade Counts and Fluid Viscosities Through Euler Head and Entropy Production Analysis. *Engineering Reports*. 2025. № 7(4). DOI: <https://doi.org/10.1002/eng2.70105>
4. Siddique M. H., Samad A., Husain A. Combined effects of viscosity and surface roughness on electric submersible pump performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A. Journal of Power and Energy*. 2017. № 231(4). DOI: <https://doi.org/10.1177/0957650917702262>
5. Омельченко О. В., Цвіркун Л. О. Гідравлічні машини : навч. посіб. Кривий Ріг : ДонНУЕТ, 2020. 100 с.
6. Chang L., Xu Q., Yang C., Su X., Dai X., Guo L. Experimental Study on Gas-Liquid Performance and Prediction of Shaft Power and Efficiency by Dimensionless Coefficients in a Multistage Electrical Submersible Pump. *Journal of Fluids Engineering*. 2023. № 145(7). DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4062087>
7. Сидоренко О. В., Жуковський М. Є. Обладнання для зберігання та транспортування ПММ : навч. посіб. Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», 2019. 212 с.
8. Насоси та компресори : підручник для студентів інженерних спеціальностей. Харків, 2017. 400 с.
9. Mihalić T., Guzović Z., Predin A. Performances and flow analysis in the centrifugal vortex pump. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*. 2013. № 135(1). DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4023198>
10. Yang W., Zhang R., Yang H., Chen X. Energy Conversion Characteristics of Flow in Vortex Pump Based on Vortex Analysis. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2024. № 55(5). DOI: <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2024.05.015>
11. Antonenko S., Pavlenko I., Kondus V., Kolisnichenko E., Ratushnyi O. A. Refined Technique for Predicting the Energy Efficiency of Small High-Speed Submersible Centrifugal Oil Pumps. *Energies*. 2025. № 18(23). DOI: <https://doi.org/10.3390/en18236175>
12. Kondus V., Andrusiak V., Sotnyk M., Ratushnyi O., Antonenko S. Economic Justification of High-Rotational Submersible Pumps Development for Water Supply Facilities. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2025. C. 26–41 DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_3



13. Pavlenko I., Ciszak O., Kondus V., Ratushnyi O., Ivchenko O., Kolisnichenko E., Kulikov O., Ivanov V. An Increase in the Energy Efficiency of a New Design of Pumps for Nuclear Power Plants. *Energies*. № 16(6). DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062929>
14. Zhang Y., Yang Z., Tong L., Zhao Y., Jia X. et al. Experiments on the Start-Up and Shutdown of a Centrifugal Pump and Performance Prediction. *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2025. № 21(4). P. 891–938. DOI: <https://doi.org/10.32604/fdmp.2024.059903>
15. Jiang L., Wang W., Shi Y., Chen J., Bai L., Zhou L. Vortex dynamics analysis of an energy loss mechanism in a centrifugal pump impeller. *Physics of Fluids*. 2025. № 37(2). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0252325>
16. Khalaf H. A., Abd W. N., Tazyukov F. K. The effect of rotational speed on the performance of the electric submersible pump. *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*, 2021. № 14(1). DOI: <https://doi.org/10.30772/qjes.v14i1.743>
17. Zhou L., Zhou C., Bai L., Agarwal R. Numerical and Experimental Analysis of Vortex Pump with Various Axial Clearances. *Water (Switzerland)*. 2024. № 16(11). DOI: <https://doi.org/10.3390/w16111602>

Дата першого надходження статті до видання: 29.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



S. Antonenko¹, E. Kolisnichenko¹, V. Kondus¹, O. Ratushnyi¹, O. Koviazin²

¹ Sumy State University

² Dmytro Motornyi Tavria State Agrrotechnological University

PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF A PUMP WITH A CENTRIFUGAL-VORTEX STAGE IN COMPARISON WITH AN ELECTRIC CENTRIFUGAL PUMP

Summary

The development of the pump industry was accompanied by a search for ways to improve technologies, design methods and equipment manufacturing. The purpose of these processes is to increase the efficiency of the units, reduce energy consumption and ensure stable operation under variable loads. Modern requirements dictate the creation of universal installations capable of operating in a wide range of flows and pressures, adapting to the characteristics of the pumped medium. This is important for industrial enterprises, where the reliability of the equipment determines the efficiency of technological processes.

The problem of transporting highly viscous liquids, which create additional hydraulic resistance and reduce productivity, remains relevant. Its solution requires special design solutions. Progress in mechanical engineering and the development of related technologies contribute to the emergence of new approaches to pump design, which ensure the efficiency of work with highly viscous and heterogeneous media. It is important to take into account changes in the composition and physicochemical characteristics of liquids, as they significantly affect the parameters of the systems and form new requirements for pumps, in particular regarding materials and operating modes.

The paper presents the results of an experimental study of the hydraulic characteristics of a pump with a centrifugal-vortex stage at different speeds of rotation of the working body. The operating characteristics were constructed, a comparative analysis of energy efficiency depending on the speed was carried out and a comparison was made with electric centrifugal pumps. The optimal operating modes were determined, ensuring maximum productivity at minimal energy costs, and promising areas of application of pumps with centrifugal-vortex stages in industrial processes related to pumping complex media were outlined.

Keywords: Pump, impeller, stage, flow, pressure, power, efficiency, energy efficiency.