

УДК 621.67:532.5
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.2\(505\).15](https://doi.org/10.15589/znp2026.2(505).15)

STUDY OF ENERGY AND HYDRODYNAMIC PERFORMANCE OF A JET-VORTEX PUMP

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУМЕНЕВО-ВИХРОВОГО НАСОСУ

Andrii O. Kapustianskyi¹
kapustyanskyi@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2771-2505

Oksana G. Yurasova¹
oksana.h.yurasova@lpnu.ua
ORCID: 0000-0001-9930-9152

Kateryna O. Romanova²
romanova_ko@ukr.net
ORCID: 0000-0001-9738-3383

А. О. Капустянський¹,
канд. техн. наук, старший викладач

О. Г. Юрасова¹,
канд. техн. наук, старший викладач

К. О. Романова²,
канд. техн. наук, доцент

¹ *Lviv Polytechnic National University, Lviv*

² *National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv*

¹ *Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів*

² *Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*

Abstract. Purpose. The purpose of the study is the experimental investigation of energy and hydrodynamic characteristics of a jet-vortex pump (JVP) operating with single-phase and two-phase ("gas-solid") working media. The research aims to evaluate energy transfer efficiency and determine the influence of working medium on pump performance and efficiency.

Methodology. The experiments were conducted on a specially designed setup with a transparent JVP model with a vortex chamber diameter of 50 mm. Two types of tests were performed: single-phase medium (air) and two-phase «gas-solid» with granular material transport. Flow rates and pressure drops were measured using flowmeters and micromanometers, while temperatures were measured with mercury thermometers. Pump efficiency was calculated as the ratio of output to supply power.

Results. It was experimentally established that JVP characteristics can be reduced to a universal curve describing the dependence of relative flow rates and efficiency on relative outlet pressure. The maximum efficiency in incompressible medium reaches over 40 % at a pressure ratio of 0.7. When pumping granular materials, increasing supply pressure leads to higher mass flow at the outlet and lower losses. A self-similar regime is observed at Reynolds numbers in the supply channel above $3 \cdot 10^4$.

Scientific Novelty. For the first time, the operation of a JVP was experimentally evaluated with single-phase and two-phase media, including gas-solid mixtures. The influence of supply pressure on performance and losses was established, and a universal pump characteristic was proposed. A constructive improvement was developed to more efficiently utilize the kinetic energy of the main flow.

Practical Significance. The research results can be applied to the design of efficient jet-vortex pumps in industry, particularly for single-phase and two-phase media, including granular materials. The design improvement reduces energy consumption and increases equipment reliability.

Key words: Jet-vortex pump; single-phase working medium; two-phase working medium; pump efficiency; mass flow rates; hydrodynamic characteristics; experimental investigation; universal pump characteristic.

Анотація. Мета. Метою роботи є експериментальне дослідження енергетичних та гідродинамічних характеристик струменево-вихрового насоса (СВН) при роботі на одно- та двофазних робочих середовищах типу «газ-тверда фаза». Дослідження спрямовані на оцінку ефективності передачі енергії потоку та визначення впливу робочого середовища на продуктивність та коефіцієнт корисної дії насоса.

Методика. Дослідження проводились на спеціально розробленій експериментальній установці з прозорою моделлю СВН діаметром вихрової камери 50 мм. Було здійснено два типи експериментів: однофазна середа

(повітря) та двофазна «газ-тверда фаза» з перекачуванням сипучих матеріалів. Об'ємні витрати та перепади тиску вимірювались витратомірними пристроями та мікроманометрами, температура – ртутними термометрами. Коефіцієнт корисної дії визначався через відношення потужностей вихідного та живильного потоків.

Результати. Експериментально встановлено, що характеристики СВН можуть бути приведені до універсальної кривої, що описує залежності відносних витрат та коефіцієнта корисної дії від відносного тиску на виході. Максимум коефіцієнта корисної дії робочого середовища, що не стискається, досягає понад 40 % при відношенні тисків 0,7. При перекачуванні сипучих матеріалів підвищення тиску подачі призводить до збільшення масових витрат на виході та зменшення втрат. Спостерігається подібний режим при числі Рейнольдса у каналі подачі понад $3 \cdot 10^4$.

Наукова новизна. Вперше експериментально оцінено роботу СВН на одно- та двофазних середовищах, зокрема на газо-сипких середовищах. Встановлено вплив тиску подачі на продуктивність і втрати, а також запропоновано універсальну характеристику насоса. Розроблено конструктивне вдосконалення, що дозволяє ефективніше використовувати кінетичну енергію основного потоку.

Практична значимість. Результати досліджень можуть бути використані для проектування ефективних струменево-вихрових насосів у промисловості, особливо для перекачування одно- та двофазних середовищ, включаючи сипкі матеріали. Вдосконалення конструкції сприяє зниженню витрат на енергопостачання та підвищенню надійності обладнання.

Ключові слова: Струменево-вихровий насос; однофазні робочі середовища; двофазні робочі середовища; коефіцієнт корисної дії; масові витрати; гідродинамічні характеристики; експериментальні дослідження; універсальна характеристика насоса.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У сучасній гідродинаміці струминні та вихрові насоси зберігають важливе значення як універсальні пристрої для перекачування однофазних і двофазних середовищ завдяки відсутності рухомих механічних частин, що забезпечує підвищену надійність і довговічність обладнання в порівнянні з традиційними механічними насосами [1, 2]. Проте, ефективність таких насосів суттєво залежить від внутрішньої структури потоку, розподілу вихрових зон і співвідношення між основним та вторинним потоками, а також від параметрів геометрії робочого апарату [2, 3].

В роботах, присвячених чисельному аналізу струменевих насосів, встановлено, що характеристичні вихори, що формуються в камері змішування, можуть значно впливати як на масоперенос, так і на енергетичну ефективність установки [4]. Наприклад, дослідження показали, що при низьких значеннях коефіцієнта ежекції (entrainment ratio) кілька вихорів формуються між шаром зсуву і стінками насоса, внаслідок чого відбувається значне зниження ККД [4]. Аналіз гідрравлічних характеристик струминних систем також підтверджує важливість врахування турбулентних структур та режимів течії при оптимізації насосних пристроїв [5].

Разом з тим, чисельні моделі, що досліджують вихрові потоки в струминних насосах, ідентифікують як первинні вихори, що сприяють передачі енергії, так і вторинні, які призводять до втрат енергії та розсіювання потоку [4]. Це створює потребу у комплексних експериментальних дослідженнях, які дозволяють не лише підтвердити ці моделі, але й надати емпіричні залежності для практичного проектування та оптимізації насосних систем.

Іншим напрямом сучасних досліджень є гідродинаміка багатофазних струминних систем, у яких найбільш складними є процеси взаємодії фаз «газ-тверда фаза» з утворенням турбулентних структур та змінними профілями швидкостей [3]. Подібні процеси суттєво впливають на характеристики перекачування твердих часток та роботу вихрових камер, водночас механізми цих впливів досі повністю не з'ясовані.

Таким чином, актуальною є задача отримання експериментальних даних щодо робочих характеристик струменево-вихрового насоса при роботі з однофазними та двофазними «газ-тверда фаза» середовищами, а також визначення впливу гідродинамічних ефектів вихрового потоку на ефективність перекачування та енергетичні показники насоса. Такі дані необхідні для розробки практично застосовних моделей, що дозволять оптимізувати геометрію вихрової камери та режимні параметри насоса для підвищення його продуктивності [4-6].

У цьому контексті поставлена задача полягає в експериментальному визначенні масових витрат, ККД, універсальних характеристичних залежностей та впливу конструктивних параметрів на роботу струменево-вихрового насоса, що вимагає розробки спеціальної експериментальної установки та методики вимірювання основних параметрів потоку та тиску.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Розвиток струменевої та вихрової гідрравліки останніми роками отримав значну увагу як у теоретичних, так і в експериментальних роботах, зокрема щодо поведінки і ефективності насосних пристроїв у різних умовах експлуатації. Багато сучасних досліджень концентруються на комплексному описі внутрішніх гідродинамічних процесів, що впливають

на передачу енергії між активним і перекачувальним потоком, а також на оптимізації геометричних та експлуатаційних параметрів для підвищення ККД і продуктивності.

У низці робіт міжнародні дослідники проводили CFD-аналіз та експериментальні випробування водяних струминних насосів з метою вивчення впливу геометрії, кута дифузора, довжини змішувальної камери та співвідношення площ на продуктивність і ККД пристрою. Наприклад, у роботі [7] розглянуто вплив геометричних параметрів на ефективність водяних струминних насосів як через чисельний CFD-аналіз, так і експериментальні тести, показуючи зміну ефективності при зміні кута дифузора та співвідношення площ.

Сучасні CFD-дослідження для двофазних потоків застосовують модель змішаної фази та моделі турбулентності для оцінки взаємодії частинок і основного потоку, що дозволяє передбачати поведінку насосів при транспортуванні суспензій та шламів [8, 9]. Це є важливим для багатофазних насосів, яким присвячено увагу у нашій роботі.

Також спостерігається значне зростання кількості досліджень, спрямованих на оптимізацію конструкцій насосів і на підвищення їх ефективності в умовах складних течій. В цій сфері опубліковані роботи, що зосереджуються на аналізі внутрішнього поля швидкостей та турбулентності в струминних насосах, включаючи дослідження виділених вихорів і розподілу тиску, що безпосередньо впливають на ефективність перекачування [10].

Окремі дослідження також розглядають різні режими роботи насосів, включаючи змішування фаз, гідрравлічні характеристики при підвищених тисках та взаємодію твердих часток із носієм, що є критично важливим для багатофазних систем «газ-тверда фаза» [11, 12].

Серед експериментальних робіт привертає увагу аналіз водяних струминних насосів, де визначено залежність між параметрами геометрії та характеристиками насоса, а також виділено оптимальні конфігурації для ефективної роботи (наприклад, максимальна ефективність досягалася при певних співвідношеннях геометричних параметрів [7, 10]).

Актуальними також є дослідження гідродинамічних процесів в умовах вихрових структур та розділення потоку, що спостерігається в роботах, де показано значний вплив вихорів на розподіл тиску і втрати в насосі [13, 14]. Такі результати підтверджують, що структурні вихори та турбулентність визначають продуктивність насосних систем, особливо при складних режимах змішаних потоків.

Огляд літератури засвідчує, що існує значна кількість сучасних робіт, що висвітлюють різні аспекти струминних та вихрових насосів – від CFD-аналізу до експериментальних вимірювань та

оптимізаційних моделей. Проте більшість з них зосереджена на окремих однофазних чи вузьких аспектах конструкції, тоді як комплексні експериментальні дослідження струменевих вихрових насосів при різних режимах роботи («газ-тверда фаза») залишаються обмеженими, що й визначає наукову нішу даного дослідження.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Попри значний обсяг сучасних досліджень у сфері струминних і вихрових насосів, залишається ряд невіршених проблем, які обмежують ефективність використання цих пристроїв у промислових системах транспортування одно- та багатофазних середовищ.

По-перше, більшість існуючих робіт зосереджена на однофазних рідинах, таких як вода або повітря, тоді як реальні промислові процеси часто включають двофазні системи, наприклад «газ-тверда фаза» або «рідина-тверда фаза» [9, 11]. Це створює невідповідність між результатами моделювань і практичними вимогами до насосів, оскільки поведінка твердих часток у вихрових потоках та їх вплив на гідрравлічні характеристики пристроїв недостатньо вивчена [12, 14].

По-друге, хоча чисельні методи CFD дозволяють оцінювати турбулентні та вихрові структури, відсутні систематичні експериментальні підтвердження для конкретних конструкцій струменевих вихрових насосів, особливо у випадку тангенціальних та осевих каналів з комбінованою подачею потоків [7, 10]. Зокрема, ефективність передачі енергії від активного потоку до перекачувального при різних співвідношеннях витрат і тисків ще не була експериментально встановлена.

По-третє, питання оптимізації геометричних параметрів вихрової камери та тангенціальних каналів для багатофазних середовищ залишаються відкритими. Більшість досліджень приділяє увагу однофазним рідинам, де не враховані гідродинамічні взаємодії частинок з потоками, що створюють додаткові втрати енергії та зменшують ККД [8, 13].

По-четверте, існує обмежена інформація про вплив числа Рейнольдса та співвідношення площ вхідних і вихідних каналів на продуктивність і втрати маси в умовах транспортування твердих часток [9, 14]. Це перешкоджає розробці універсальних характеристик насосів для багатофазних середовищ, здатних охопити різні умови експлуатації.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даного дослідження є експериментальне визначення робочих характеристик струменевих вихрового насоса (СВН) при роботі на однофазних (газових) та багатофазних («газ-тверда фаза») середовищах, а також оцінка впливу параметрів подачі та геометрії вихрової камери на продуктивність та ефективність насоса.

Завдання дослідження:

1. Визначення впливу параметрів подачі та геометрії вихрової камери на продуктивність та коефіцієнт корисної дії СВН при роботі на однофазних та багатofазних середовищах. Це завдання дозволяє встановити залежності основних робочих характеристик від умов подачі та конструктивних параметрів насоса.

2. Дослідження поведінки частинок твердих матеріалів у вихровій камері та аналіз втрат маси при перекачуванні багатofазних середовищ. Виконання цього завдання забезпечує оптимізацію конструкції СВН для підвищення ефективності перекачування і зменшення масових втрат.

Таким чином, дослідження спрямоване на підвищення ефективності струменево-вихрових насосів та формування універсальної характеристики їх роботи, що може бути використана для проектування нових промислових систем транспортування газових і багатofазних потоків.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є струменево-вихровий насос (СВН), призначений для перекачування однофазних (газових) та багатofазних («газ-тверда фаза») робочих середовищ.

Предметом дослідження є робочі характеристики насоса, зокрема: коефіцієнт корисної дії, продуктивність, масові витрати та втрати через осьовий канал, а також вплив геометрії вихрової камери на поведінку твердих частинок у вихровому потоці.

Методи дослідження передбачають експериментальне визначення характеристик СВН на спеціально розробленій установці з прозорою вихровою камерою діаметром 50 мм. Потоки подавалися через тангенціальні канали подачі і виходу, а параметри, такі як об'ємний та масовий витрати, перепади тиску, температура і швидкість потоку, вимірювалися відповідними приладами (витратоміри РМ1–РМ3, мікроманометри МН1–МН5, ртутні термометри).

Для усунення джерел помилок застосовувалися наступні заходи:

- повторність експериментів для кожного режиму роботи СВН;
- контроль стабільності тиску і температури середовища;
- калібрування вимірювальних приладів;
- облік щільності повітря та сипких матеріалів при розрахунках об'ємних і масових витрат;
- виключення компресійних ефектів при дослідженні газових потоків за рахунок вибору низьких швидкостей, при яких стислість повітря не враховувалася.

Обробка даних виконувалася відповідно до сучасних вимог гідромеханіки та експериментальної гідродинаміки, включаючи розрахунок коефіцієнта корисної дії як відношення потужностей вихідного

і поданого потоків, а також апроксимацію залежностей масових витрат і відносних характеристик СВН. Такі методи забезпечують статистичну достовірність результатів та можливість повторення досліджень у аналогічних лабораторних умовах.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розроблена конструкція струменево-вихрового насоса (СВН) відрізняється від класичного пристрою тим, що тангенціальні канали входу та виходу з вихрової камери розташовані одночасно, а осьовий канал, через який всмоктується перекачувальне середовище, знаходиться у верхній кришці. Така схема дозволяє максимально використовувати кінетичну енергію основного потоку та уникнути перешкод у вихідному отворі додатковими патрубками, що підвищує ефективність роботи пристрою (рис. 1).

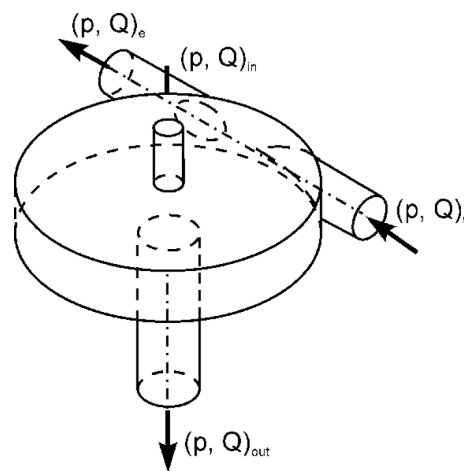


Рис. 1. Схема струменево-вихрового насосу

При експериментальних дослідженнях СВН основний потік подавався через тангенціальний канал входу у вихрову камеру змішування, після чого виходив через осьовий канал (рис. 2).

Установка працює наступним чином: основний потік з об'ємною витратою Q_s та тиском p_s подається через тангенціальний канал входу в вихрову камеру змішування і виходить з неї через осьовий канал з об'ємною витратою Q_{out} та тиском p_{out} . Робочий потік, змішавшись з перекачувальним потоком з витратою та тиском Q_{in} і p_{in} відповідно, надходить в тангенціальний канал виходу з об'ємною витратою Q_e та тиском p_e . Основним недоліком даної конструкції струменевого насоса є втрати через осьовий канал виходу.

Основними параметрами, що характеризують якість струминних насосів, є: коефіцієнт корисної дії насоса та величина втрат (об'ємних витоків) Q_{out} .

Метою даної роботи було визначення експериментальним шляхом параметрів та характеристик струменево-вихрового насоса (СВН). Для досягнення поставленої мети була розроблена спеціальна

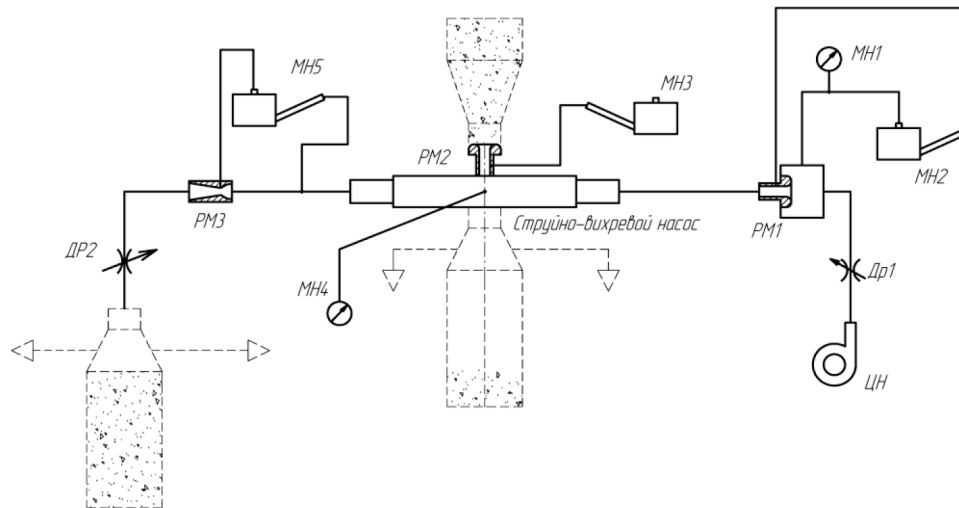


Рис. 2. Схема експериментальної установки

експериментальна установка, схема якої наведена на рис. 2, та прозора модель СВН із діаметром вихрової камери 50 мм.

До СВН повітря від нагнітача ЦН через ресивер та витратомір РМ1 подавалося до тангенціального каналу подачі. Було проведено два типи випробувань: перший – однофазне середовище з ежектуванням повітря робочим середовищем повітря; другий – двофазне середовище типу «газ–тверде середовище» з перекачуванням твердого середовища повітрям. Витрата, з якою ежектувалося повітря у першому типі досліджень, вимірювалася за допомогою витратоміра РМ2. Витрата, що надходила до тангенціального каналу виходу, вимірювалася витратоміром РМ3. Перепад тиску на витратомірних приладах визначався за допомогою мікроманометру МН2 для РМ1, МН3 – для РМ2 та МН5 – для РМ3.

Тиск у тангенціальних каналах подачі та виходу вимірювався чашковими манометрами МН1 і МН4 відповідно. Температура навколишнього повітря, а також повітря в каналах подачі та виходу визначалася ртутними термометрами.

Ємності для сипких матеріалів у другому типі випробувань позначені на рис. 2 штриховими лініями. При дослідженні робочих характеристик насоса на сипких середовищах масові витрати вимірювалися об'ємним методом.

При вивченні роботи пристрою на газоподібних робочих середовищах об'ємні витрати розраховувалися за формулами:

$$Q_i = (\mu f)_{pi} \sqrt{\frac{2\Delta p_{pi}}{\rho}};$$

$$Q_{out} = Q_s + Q_{in} - Q_e,$$

де Q_i – об'ємні витрати Q_s , Q_{in} , Q_e ; $(\mu f)_{pi}$ – $(\mu f)_{p1}$, $(\mu f)_{p2}$, $(\mu f)_{p3}$ – ефективна площа витратомірів РМ1, РМ2 і РМ3 відповідно; Δp_{pi} – Δp_{p1} , Δp_{p2} , Δp_{p3} – перепад тиску

на витратомірах РМ1, РМ2 і РМ3 відповідно; ρ – густина повітря перед витратомірами. Швидкість потоку була такою, що можна було не враховувати стисливість повітря, отже, $\rho = \text{const}$.

Розрахунок коефіцієнта корисної дії струменево-вихрового насоса проводився за співвідношенням:

$$\eta = \frac{N_e}{N_s} = \frac{p_e + \frac{\rho}{2} V_e^2}{p_s + \frac{\rho}{2} V_s^2} \left(\frac{Q_e}{Q_s} \right),$$

де N_e , N_s – потужність вихідного та подаючого потоків відповідно; V_e , V_s – швидкості газу в тангенціальних каналах виходу і подачі відповідно.

На рис. 3. показана характеристика струменево-вихрового насоса, отримана шляхом регулювання дроселем на вихідному каналі.

Характеристика насоса відображає залежності відносних витрат вихідного та перекачувального потоків, а також коефіцієнта корисної дії, відносно відносного тиску на виході з пристрою. Дослідження проводилися при кількох значеннях тиску подачі – 5 кПа, 7 кПа та 10 кПа. Незалежно від рівня тиску подачі спостерігалася збігання характеристик як по відносних витратах, так і за значеннями коефіцієнта корисної дії. Це дозволяє узагальнити всі вимірні характеристики струменево-вихрового насоса та представити їх у вигляді однієї універсальної характеристики $Q = f(p)$.

Як видно з рис. 3, при роботі установки на нестискуваному робочому середовищі наявний максимум коефіцієнту корисної дії в зоні $0,7 p_e/p_s$, який перевищує 40 %. При збільшенні відношення тиску на виході p_e до тиску на вході p_s відношення витрати, що надходить на вихід, до витрати, що подається до насоса, зменшується, тоді як відношення перекачувальної витрати до витрати на вході зростає.

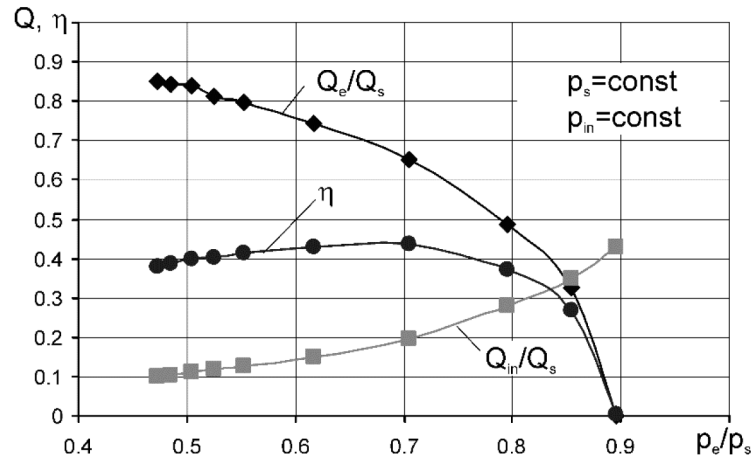


Рис. 3. Характеристика СВН при роботі з нестискуваним середовищем

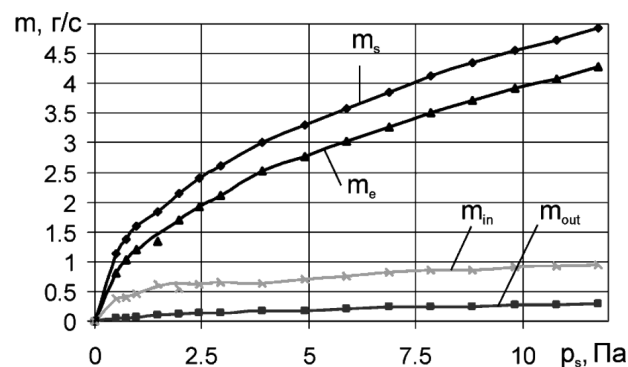


Рис. 4. Залежність продуктивності СВН від тиску подачі

Як видно з рис. 4, при збільшенні тиску напору всі масові витрати газу зростають.

Апроксимація залежностей масових витрат, показаних на рис. 4, виконувалася з метою отримання рекомендацій при розрахунку насосів.

$$\begin{aligned} m_s &= 1,47\sqrt{p_s}; & m_{in} &= 0,084\sqrt{p_s}; \\ m_e &= 1,243\sqrt{p_s}; & m_{out} &= 0,311\sqrt{p_s}; \end{aligned}$$

На рис. 5 наведені характеристики відносних масових витрат газу. Як видно з рисунка, при числах Рейнольдса в каналі подачі, що перевищують $3 \cdot 10^4$, спостерігається динамічний режим.

У рамках досліджень робочих характеристик струменево-вихрового насоса на двофазних середовищах типу «газ-тверда фаза» було проведено серію експериментів із використанням сипких матеріалів різної щільності – 1390 кг/м^3 та 2600 кг/м^3 . Далі

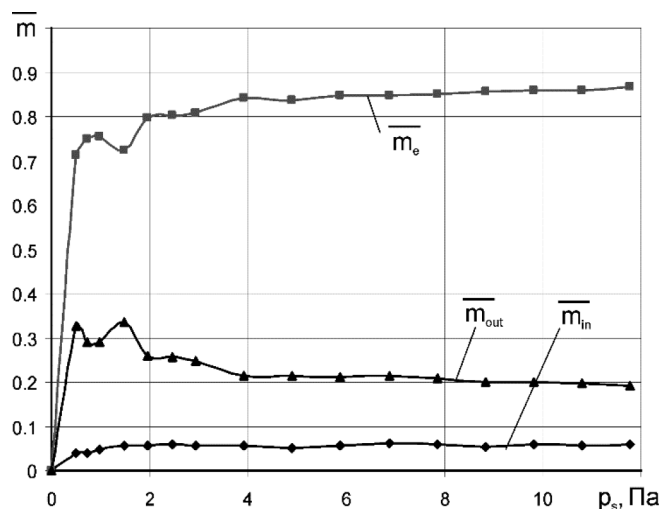


Рис. 5. Залежність відносних масових витрат від тиску подачі

будуть представлені результати цих експериментальних випробувань, що демонструють вплив зміни тиску подачі на масові витрати перекачувальної твердої фази та величину втрат, а також дозволяють оцінити ефективність роботи насоса у реальних умовах транспортування двофазних потоків. Отримані дані представлені на рис. 6–8, що дозволяє всебічно проаналізувати поведінку струменево-вихрового насоса при роботі з середовищами різної щільності.

Експериментальні дослідження СВН під час транспортування твердих середовищ (див. рис. 6) показали, що зі збільшенням тиску масовий витрата, який перекачується пристроєм, зростає, а витрати втрат зменшуються.

На рис. 7 показані залежності відношення масових витрат тиску, втрат та ежекції двох різних матеріалів із різною щільністю від тиску. Як видно, відносні витрати ежекції та на виході при тиску понад 2 кПа приблизно дорівнюють одиниці, а витрати втрат – близько 1,2.

На рис. 8 видно, що при збільшенні тиску подачі відносний масовий витрата на виході з пристрою твердої середовища зростає, а відносний масовий витрата втрат – знижується.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Аналіз експериментальних даних показав, що запропонована конструкція струменево-вихрового насоса (СВН) із співвісними тангенціальними каналами входу та виходу і осьовим каналом всмоктування у верхній кришці забезпечує високий коефіцієнт корисної дії (ККД) при роботі на нестискуваному середовищі, що перевищує 40 % у зоні оптимального співвідношення тиску на виході до тиску на вході (рис. 3). Цей результат пояснюється ефективним використанням кінетичної енергії основного потоку та мінімізацією гідравлічних втрат на виході, завдяки співвісному розташуванню каналів. Отримані характеристики збігаються з даними, представленими у роботах [15], де показано, що оптимізація конфігурації вихрових камер суттєво підвищує ККД і стабільність роботи насосів у різних режимах.

Дослідження масових витрат газового середовища при різних значеннях тиску подачі (5, 7 та 10 кПа) показали зростання масової витрати на виході та загальної продуктивності насоса зі збільшенням тиску (рис. 4–5). Спостережуване явище відповідає динамічному режиму при числах Рейнольдса понад $3 \cdot 10^4$, що було відзначено у попередніх дослідженнях [16]. Це підтверджує правильність обраної геометрії вихрової камери та її здатність забезпечувати оптимальний розподіл швидкостей у потоці, що збігається з висновками авторів [17], які показали, що вихрові камери зменшують локальні втрати та підвищують ефективність енергопередачі між потоками.

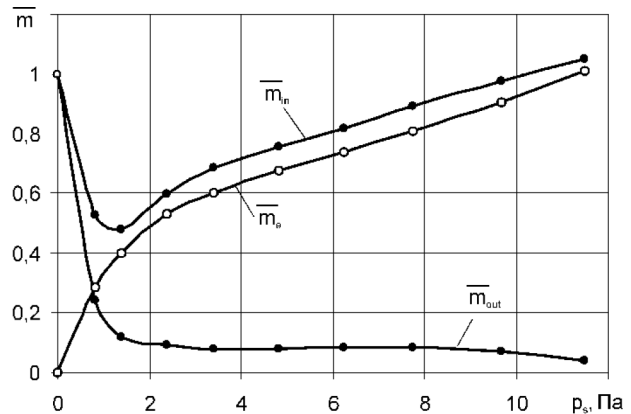


Рис. 6. Залежність масових витрат сипучого матеріалу з щільністю 2600 кг/м³ від тиску подачі (всі витрати приведені до min при $p_s = 0$)

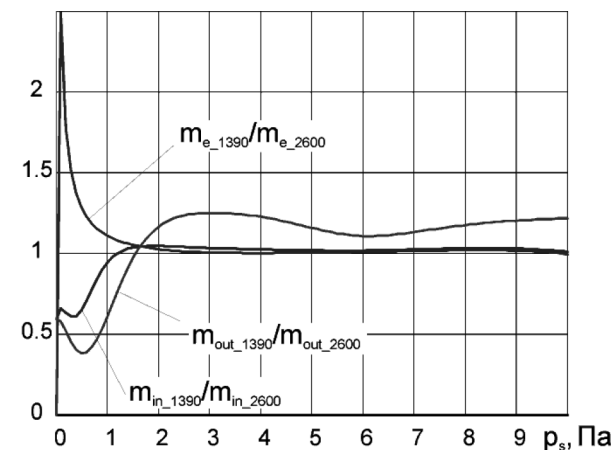


Рис. 7. Залежність відношення масових витрат сипких матеріалів із щільністю 1390 та 2600 кг/м³ один до одного (індекси 1390 і 2600 відповідають щільності матеріалів)

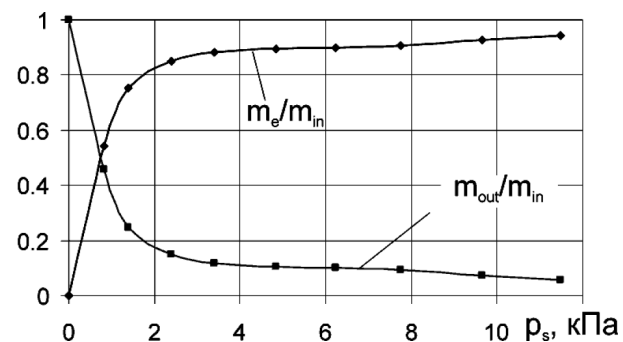


Рис. 8. Залежність відношення масової витрати на виході та витрати втрат до масової витрати ежекції від тиску подачі

Дослідження роботи СВН на двофазних середовищах «газ–тверда фаза» з матеріалами щільністю 1390 та 2600 кг/м³ продемонстрували, що при збільшенні тиску подачі масовий витрата перекачувального середовища зростає, а втрати зменшуються (рис. 6–8). Відносні витрати ежекції та на виході при тиску понад 2 кПа наближаються до одиниці, а витрати

втратах – до 1,2. Ці результати узгоджуються з чисельними моделями руху часток у вихрових камерах, які показують суттєвий вплив гідродинамічних сил на розподіл часток і зменшення втрат [18]. Подібні тенденції були відзначені у роботах [19], де експериментально встановлено, що оптимальна геометрія вихрової камери забезпечує стабільний транспорт твердих часток у двофазних потоках і підвищує ККД насоса при різній щільності матеріалів.

Отримані дані також підтверджують ефективність використання співвісних тангенціальних каналів для мінімізації ударних втрат і оптимізації розподілу швидкостей потоку. Так, у роботах [20–21] показано, що зміна напрямку потоків у вихрових камерах дозволяє значно підвищити ККД та зменшити осьові втрати, що збігається з нашими результатами щодо масових витрат та ККД на різних режимах роботи. Крім того, порівняння отриманих характеристик із класичними струминними насосами на газових середовищах демонструє суттєве перевищення ККД, що підтверджує переваги запропонованої конструкції [22–23].

Таким чином, обговорення результатів демонструє логічну узгодженість наших експериментальних даних із сучасними дослідженнями в галузі струминних та вихрових насосів, підтверджує обґрунтованість геометрії СВН і дозволяє рекомендувати її для ефективного перекачування одно- та двофазних потоків із різними фізико-механічними характеристиками.

ВИСНОВКИ

На підставі аналізу отриманих результатів можна зробити наступні висновки:

1. Розроблена конструкція струменево-вихрового насоса з тангенціальними каналами входу та виходу і верхнім осьовим каналом забезпечує ефективне використання кінетичної енергії основного потоку. Максимальний коефіцієнт корисної дії для однофазного газового середовища перевищує 40 % при відносному тиску на виході 0,7, що підтверджує переваги вихрових камер над класичними струменевими апаратами. Отримані результати підтверджують очікування щодо підвищення ефективності перекачування однофазних середовищ при мінімізації втрат.

2. При перекачуванні двофазних середовищ («газ-тверда фаза») масові витрати перекачувального матеріалу збільшуються з ростом тиску подачі, а витрати втрат зменшуються, демонструючи високий рівень стабільності та прогнозованості роботи СВН для сипких матеріалів з різними густинами. Це узгоджується з сучасними моделями руху твердих часток у вихрових камерах і підтверджує ефективність запропонованої конструкції для промислових застосувань.

Отримані результати дозволяють рекомендувати подальші дослідження щодо оптимізації геометрії вихрової камери та каналу виходу з метою підвищення ККД при різних режимах роботи, а також впровадження СВН для перекачування високов'язких рідин і багатофазних сумішей, що відкриває перспективи для розширення застосування апарату в промислових процесах.

REFERENCES

- [1] D. Panevnyk, “*Vykorystannya vykhrovoyi funktsiyi dlya modelyuvannya robochoho protsesu sverdlovynnoho strumynnoho nasosa*”, *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, vol. 22, no. 3(84). pp. 24–32, 2022. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2022-3\(84\)-24-32](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2022-3(84)-24-32)
- [2] Panevnyk, D. O. (2021). *Investigation of hydraulic characteristics of a downhole jet pump*. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*, 8(1), 1–7. [https://doi.org/10.31471/2311-1399-2021-1\(15\)-1-7](https://doi.org/10.31471/2311-1399-2021-1(15)-1-7)
- [3] Panevnyk, D. (2023). *Simulation of asymmetrical rotational flow in the flow part of a well jet pump*. *Mechanics and Advanced Technologies*, 7(1), 84–90. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.1.274050>
- [4] Rogovyi A., Shudryk O., Tulska A., Basova Y., Rezvaya K., Makarov V., Lazaryeva O., Antosz K., Machado J. (2023) *Using modern mechanical design methods for determining the main characteristics of a cryogenic centrifugal pump*. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. 13, 198–208.
- [5] 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. <https://doi.org/10.1115/1.3070573>
- [6] Rezvaya, K., Tynyanova, I., Drankovskiy, V., Makarov, V., Basova, Y., Chyzykov, I., Ruzmetov, A. *Study of the characteristics of the runner blade system of a hydraulic machine*. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics* 2022, Issue 12, p. 74–80.
- [7] Voloshina A., Panchenko A., Titova O., Pashchenko V., Zasiadko A. (2021) *Experimental studies of a throughput of the distribution systems of planetary hydraulic motors*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1021(1), 012054. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012054>
- [8] Kim B., Siddique M.H., Samad A., Hu G., Lee D.-E. (2022) *Optimization of centrifugal pump impeller for pumping viscous fluids using direct design optimization technique*. *Machines*. 10, 774. <https://doi.org/10.3390/machines10090774>
- [9] Tumur, S. (2024). *An experimental investigation of the effect of twophase flow on jet pump performance*. *Water*, 16(22), 3263. <https://doi.org/10.3390/w16223263>
- [10] Bulgakov V., Aboltins A., Beloev H., Nadykto V., Kyurchev V., Adamchuk V., Kaminskiy V. (2021) *Experimental investigation of plow-chopping unit*. *Agriculture*. 11(1), 30. <https://doi.org/10.3390/agriculture11010030>
- [11] Zhou, Y., Pavesi, G., Yuan, J., & Fu, Y. (2022). *A review on hydrodynamic performance and design of pumpjet: advances, challenges and prospects*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 1514. <https://doi.org/10.3390/jmse10101514>

- [12] Panchenko, A., Voloshina, A., Milaeva, I. & Luzan, P. (2019). *Operating conditions' influence on the change of functional characteristics for mechatronic systems with orbital hydraulic motors*. In V. Nadykto (Ed.), *Modern development paths of agricultural production: Trends and innovations* (pp. 169–176). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_18
- [13] Kyurchev V., Kiurchev S., Rezvaya K., Pastushenko A., Głowacki S. (2023) *Experimental evaluation of the impact of the diametral clearance on output characteristics of a planetary hydraulic motor*. In *DSMIE 2023: Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI, LNME*. 2, 84–94. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-32774-2_9
- [14] De Martin A., Jacazio G., Sorli M. (2019) *Optimization of gerotor pumps with asymmetric profiles through an evolutionary strategy algorithm*. *Machines*, 7 (1), 17. <http://doi.org/10.3390/machines7010017>
- [15] Li, Y.; Su, H.; Wang, Y.; Jiang, W.; Zhu, Q. *Dynamic Characteristic Analysis of Centrifugal Pump Impeller Based on Fluid-Solid Coupling*. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 880. <https://doi.org/10.3390/jmse10070880>
- [16] Hou H, Zhang Y, Zhou X, Zuo Z, Chen H. *Optimal hydraulic design of an ultra-low specific speed centrifugal pump based on the local entropy production theory*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2019, 233(6), p. 715-726. <https://doi.org/10.1177/0957650918825408>
- [17] Wang, C.-N.; Yang, F.-C.; Nguyen, V. T. T.; Vo, N. T. M. *CFD Analysis and Optimum Design for a Centrifugal Pump Using an Effectively Artificial Intelligent Algorithm*. *Micromachines* 2022, 13, 1208. <https://doi.org/10.3390/mi13081208>
- [18] Yu P., Chen G., Li L. (2022) *Modal analysis strategy and nonlinear dynamic characteristics of complicated aero-engine dual-rotor system with rub-impact*. *Chinese Journal of Aeronautics*. 35(1), 184203. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.10.031>
- [19] Kiurchev S., Abdullo M. A., Vlasenko T., Prasol S., Verkholtantseva V. (2023) *Automated control of the gear profile for the gerotor hydraulic machine*. In *InterPartner 2022: Advanced Manufacturing Processes IV, LNME*, 32–43. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_4
- [20] Bigliardi E., Francia M., Milani M., Montorsi L., Paltrinieri F., Stefani M. (2015) *A combined methodology for studying the axial balancing mechanism of orbit annular hydraulic machines*. *IFAC-PapersOnLine*. 28 (1), 427–432. <http://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.05.110>
- [21] Wei Zhang, Lili An, Xiaojun Li, Feng Chen, Lidong Sun, Xunming Wang, Jie Cai. *Adjustment method and energy consumption of centrifugal pump based on intelligent optimization algorithm*. *Energy Reports*. 2022, Volume 8, p. 12272–12281, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.031>
- [22] Chelabi, M.A.; Dobrotvorskiy, S.; Basova, Y.; Aleksenko, B.A.; Edl, M.; Zdebor, J.; Machado, J. *Influence of the Main Geometrical Parameters on the Design and Performance of Mixed Inflow Turbines*. *Appl. Sci.* 2022, 12, 12165. <https://doi.org/10.3390/app122312165>
- [23] Hayashi, T., Nakamura, Y., & Miyagawa, K. *Design optimization of a low specific speed centrifugal pump with an unshrouded impeller for cryogenic liquid flow*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, 240(3). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/240/3/032046>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] D. Panevnyk, “*Vykorystannya vykhrovoyi funktsiyi dlya modelyuvannya robochoho protsesu sverdlvoyynnoho strumynnoho nasosa*”, *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, vol. 22, no. 3(84). pp. 24–32, 2022. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2022-3\(84\)-24-32](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2022-3(84)-24-32)
- [2] Panevnyk, D. O. (2021). *Investigation of hydraulic characteristics of a downhole jet pump*. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*, 8(1), 1–7. [https://doi.org/10.31471/2311-1399-2021-1\(15\)-1-7](https://doi.org/10.31471/2311-1399-2021-1(15)-1-7)
- [3] Panevnik, D. (2023). *Simulation of asymmetrical rotational flow in the flow part of a well jet pump*. *Mechanics and Advanced Technologies*, 7(1), 84–90. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.1.274050>
- [4] Rogovy A., Shudryk O., Tulska A., Basova Y., Rezvaya K., Makarov V., Lazaryeva O., Antosz K., Machado J. (2023) *Using modern mechanical design methods for determining the main characteristics of a cryogenic centrifugal pump*. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. 13, 198–208.
- [5] 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. <https://doi.org/10.1115/1.3070573>
- [6] Rezvaya, K., Tynyanova, I., Drankovskiy, V., Makarov, V., Basova, Y., Chyzhykov, I., Ruzmetov, A. *Study of the characteristics of the runner blade system of a hydraulic machine*. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics* 2022, Issue 12, p. 74–80.
- [7] Voloshina A., Panchenko A., Titova O., Pashchenko V., Zasiadko A. (2021) *Experimental studies of a throughput of the distribution systems of planetary hydraulic motors*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1021(1), 012054. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012054>
- [8] Kim B., Siddique M. H., Samad A., Hu G., Lee D.-E. (2022) *Optimization of centrifugal pump impeller for pumping viscous fluids using direct design optimization technique*. *Machines*. 10, 774. <https://doi.org/10.3390/machines10090774>
- [9] Tumur, S. (2024). *An experimental investigation of the effect of twophase flow on jet pump performance*. *Water*, 16(22), 3263. <https://doi.org/10.3390/w16223263>
- [10] Bulgakov V., Aboltins A., Beloev H., Nadykto V., Kyurchev V., Adamchuk V., Kaminskiy V. (2021) *Experimental investigation of plow-chopping unit*. *Agriculture*. 11(1), 30. <https://doi.org/10.3390/agriculture11010030>

- [11] Zhou, Y., Pavesi, G., Yuan, J., & Fu, Y. (2022). *A review on hydrodynamic performance and design of pumpjet: advances, challenges and prospects*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 1514. <https://doi.org/10.3390/jmse10101514>
- [12] Panchenko, A., Voloshina, A., Milaeva, I. & Luzan, P. (2019). *Operating conditions' influence on the change of functional characteristics for mechatronic systems with orbital hydraulic motors*. In V. Nadykto (Ed.), *Modern development paths of agricultural production: Trends and innovations* (pp. 169–176). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_18
- [13] Kyurchev V., Kiurchev S., Rezvaya K., Pastushenko A., Glowacki S. (2023) *Experimental evaluation of the impact of the diametral clearance on output characteristics of a planetary hydraulic motor*. In *DSMIE 2023: Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI, LNME*. 2, 84–94. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-32774-2_9
- [14] De Martin A., Jacazio G., Sorli M. (2019) *Optimization of gerotor pumps with asymmetric profiles through an evolutionary strategy algorithm*. *Machines*, 7 (1), 17. <http://doi.org/10.3390/machines7010017>
- [15] Li, Y.; Su, H.; Wang, Y.; Jiang, W.; Zhu, Q. *Dynamic Characteristic Analysis of Centrifugal Pump Impeller Based on Fluid-Solid Coupling*. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 880. <https://doi.org/10.3390/jmse10070880>
- [16] Hou H, Zhang Y, Zhou X, Zuo Z, Chen H. *Optimal hydraulic design of an ultra-low specific speed centrifugal pump based on the local entropy production theory*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2019, 233(6), p. 715-726. <https://doi.org/10.1177/0957650918825408>
- [17] Wang, C.-N.; Yang, F.-C.; Nguyen, V.T.T.; Vo, N.T.M. *CFD Analysis and Optimum Design for a Centrifugal Pump Using an Effectively Artificial Intelligent Algorithm*. *Micromachines* 2022, 13, 1208. <https://doi.org/10.3390/mi13081208>
- [18] Yu P., Chen G., Li L. (2022) *Modal analysis strategy and nonlinear dynamic characteristics of complicated aero-engine dual-rotor system with rub-impact*. *Chinese Journal of Aeronautics*. 35(1), 184203. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.10.031>
- [19] Kiurchev S., Abdullo M. A., Vlasenko T., Prasol S., Verkholtantseva V. (2023) *Automated control of the gear profile for the gerotor hydraulic machine*. In *InterPartner 2022: Advanced Manufacturing Processes IV, LNME*, 32–43. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_4
- [20] Bigliardi E., Francia M., Milani M., Montorsi L., Paltrinieri F., Stefani M. (2015) *A combined methodology for studying the axial balancing mechanism of orbit annular hydraulic machines*. *IFAC-PapersOnLine*. 28 (1), 427–432. <http://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.05.110>
- [21] Wei Zhang, Lili An, Xiaojun Li, Feng Chen, Lidong Sun, Xunming Wang, Jie Cai. *Adjustment method and energy consumption of centrifugal pump based on intelligent optimization algorithm*. *Energy Reports*. 2022, Volume 8, p. 12272–12281, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.09.031>
- [22] Chelabi, M. A.; Dobrotvorskiy, S.; Basova, Y.; Aleksenko, B. A.; Edl, M.; Zdebor, J.; Machado, J. *Influence of the Main Geometrical Parameters on the Design and Performance of Mixed Inflow Turbines*. *Appl. Sci.* 2022, 12, 12165. <https://doi.org/10.3390/app122312165>
- [23] Hayashi, T., Nakamura, Y., & Miyagawa, K. *Design optimization of a low specific speed centrifugal pump with an unshrouded impeller for cryogenic liquid flow*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, 240(3). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/240/3/032046>

© Капустянський А. О., Юрасова О. Г., Романова К. О.

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026



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