

А. С. РОГОВИЙ, Є. І. ТІМЧЕНКО, А. О. НЕСКОРОЖЕНИЙ, Д. Р. ДЬОМІН, Є. М. ЦЕНТА

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКУ У ВИХРОВИХ КАМЕРАХ НАСОСІВ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ІНСТРУМЕНТА НА ПОТІК

Досліджено вплив вимірювального інструменту на течію у вихорокамерному насосі (ВКН). Чисельне моделювання виконано в ANSYS CFX із використанням RANS-моделі турбулентності SST; проведено стаціонарні та нестаціонарні розрахунки на неструктурованих сітках із контролем збіжності та критеріїв якості пристінного шару. Розглянуто декілька конфігурацій розміщення інструмента: у торцевій кришці (для різних відносних діаметрів) та на бічній поверхні камери. Оцінювання впливу здійснювалося за полями швидкості у меридіональній та горизонтальній площинах, картами різниці швидкостей відносно базового (безінструментального) випадку, ізоповерхнями λ_2 -критерію та розподілами інтенсивності турбулентності. Показано, що отвори в торцевих кришках практично не змінюють енергетичні параметри насоса: погіршення ККД і витрати не перевищує $\approx 5\%$ у широкому діапазоні відносних діаметрів зонда – у межах типових експериментальних похибок. Натомість бічне встановлення спричиняє суттєву асиметрію течії, локальне підсилення турбулентності та помітне падіння ефективності: у найгіршому випадку ККД знижується до 0,32 від базового рівня. Виявлено, що основне систематичне відхилення у вимірюваннях стосується тангенціальної (обертальної) компоненти швидкості: рідина в каналі інструмента не встигає набути кутової швидкості основного потоку, тож локально занижується вимірюване значення. Для мінімізації впливу рекомендовано: розміщувати зонд у торцевій кришці; обмежувати відносний діаметр інструмента значенням $\leq 0,25$ діаметра горла камери; орієнтувати приймач перпендикулярно до вимірюваної компоненти швидкості. Отримані результати конкретизують умови репрезентативності контактних вимірювань у ВКН та можуть бути використані для планування експериментів і побудови корекційних методик порівняння з CFD.

Ключові слова: вихорокамерний насос, чисельне моделювання, експериментальні дослідження, вимірювальний інструмент, ефективність, турбулентність.

A. ROGOVYI, Ye. TIMCHENKO, A. NESKOROZHENYI, D. DOMIN, Ye. TSENTA

RESEARCH ON MEASURING FLOW CHARACTERISTICS IN PUMP VORTEX CHAMBERS, TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF THE INSTRUMENT ON THE FLOW

The study quantifies how a measuring probe perturbs the internal flow of a vortex chamber pump (VCP) and affects its integral energy metrics. CFD simulations were performed in ANSYS CFX using the RANS SST turbulence model; both steady and unsteady runs on unstructured meshes were executed with strict convergence and near-wall quality controls. Probe locations included the end cover (for several relative diameters) and the lateral wall of the chamber. The impact was evaluated using meridional and horizontal velocity fields, speed-difference maps versus the baseline (no probe), λ_2 -criterion iso-surfaces, and turbulence intensity distributions. End-cover ports practically do not alter the pump's energy parameters: the efficiency and flow rate deterioration stay within $\approx 5\%$ across a wide range of relative probe diameters, i.e., within typical experimental uncertainty. In contrast, lateral mounting induces strong flow asymmetry, local turbulence intensity amplification, and a marked efficiency drop; in the worst case, the efficiency decreases to 0.32 of the baseline. The principal systematic measurement bias concerns the tangential (swirl) velocity component: fluid inside the probe channel does not rapidly acquire the main flow's angular speed rapidly enough, leading to locally underestimated readings. To minimize interference, we recommend: placing the probe in the end cover, limiting its relative diameter to ≤ 0.25 of the throat, and orienting the sensor standard to the measured velocity component. These results clarify the conditions for representative contact measurements in VCPs and support the design of experiments and correction procedures for CFD-experiment comparison.

Keywords: centrifugal pump, numerical modeling, flow, efficiency, mathematical modeling, turbulence.

Вступ. На сучасному етапі розвитку науки, аерогідромеханіка формується як комплексна галузь знань, що поєднує три провідні напрями – теоретичний, експериментальний та обчислювальний [1]. Кожен із них має свої особливості, сферу застосування та методичні підходи, проте в більшості досліджень вони взаємодоповнюють один одного. Для отримання надійних результатів необхідна перевірка теоретичних положень та чисельних моделей експериментальними даними, а також зворотне використання обчислювальних методів для інтерпретації експериментальних спостережень. Такий взаємозв'язок забезпечує підвищення достовірності висновків і сприяє формуванню узагальнених закономірностей у гідрогазодинаміці [2].

Разом із тим, проведення експериментальних досліджень ускладнюється низкою обмежень. Однією з ключових проблем є вплив вимірювальної апаратури на досліджуваний об'єкт [3]. У замкнутих або відкритих потокових системах навіть незначне втручання вимірювальних приладів здатне змінювати

структуру течії та спотворювати результати вимірювань [3]. Цей фактор особливо актуальний для досліджень із високими вимогами до точності визначення локальних параметрів, таких як швидкість, тиск чи турбулентні характеристики потоку [4].

Для мінімізації впливу приладів на об'єкт вимірювання дедалі частіше застосовуються оптичні методи, що дозволяють отримати просторово-часову картину течії без прямого контакту з потоком [5; 6]. Водночас використання подібних методів істотно підвищує вартість досліджень, оскільки оптична вимірювальна апаратура є складною, високоточною та дорогою [7]. Це обмежує її широке впровадження, особливо в умовах прикладних інженерних експериментів.

Контактні методи, зокрема використання трубок Піто чи термоанемометрів, залишаються більш доступними, проте вимагають ретельного аналізу впливу вимірювальних пристроїв на потік. Дослідник має бути впевнений, що похибка, пов'язана з присутністю апаратури, є мінімальною, а отримані дані можна коректно зіставляти з результатами

чисельних розрахунків [8]. У цьому контексті актуальним завданням постає пошук оптимального поєднання експериментальних і обчислювальних методів, що забезпечить високу точність і достовірність результатів при раціональних витратах ресурсів.

Аналіз останніх досліджень. Методика проведення аерогідромеханічних експериментів є предметом значної кількості наукових досліджень [9; 10]. У більшості випадків такі методики або зовсім не враховують вплив вимірювального інструменту на потік, вважаючи його незначним, або ж припускають, що уникнути спотворень принципово неможливо. Водночас очевидно, що ступінь впливу апаратури істотно залежить від характеру течії. Для прямолінійних потоків завдання обтікання циліндричних і сферичних тіл розглянуто у численних роботах [11–13], де застосовувалися як чисельні, так і аналітичні та експериментальні підходи. Результати свідчать, що локальний вплив вимірювальних елементів може суттєво змінювати кінематичні характеристики потоку. Водночас інтегральні параметри, зокрема втрати тиску, піддаються відносно простому розрахунку, що ґрунтується на визначенні коефіцієнтів місцевих гідравлічних опорів [14].

Набагато меншою мірою досліджено вплив вимірювальних приладів на енергетичні втрати та процеси обтікання циліндричних тіл у криволінійних потоках, характерних для гідравлічних машин зі складною геометрією, зокрема вихорокамерних насосів [15]. Цей тип насосів відрізняється тим, що в їх робочій порожнині поєднуються риси відцентрового та прямооточного струминного насосів [16]. Відомо, що класичні струминні насоси характеризуються низьким коефіцієнтом корисної дії, що стимулює пошук нових підходів до підвищення їх енергоефективності. Одним із перспективних напрямів вважається комбінування робочих процесів з використанням відцентрової сили для покращення характеристик струминної техніки [17; 18].

Вивчення гідродинамічних особливостей течії у вихорокамерних насосах набуває особливої актуальності, оскільки ці агрегати демонструють вищі показники ефективності при перекачуванні сипучих сумішей порівняно з прямооточними струминними насосами [19]. Крім того, вони перевершують відцентрові насоси за рівнем надійності та довговічності, що робить їх перспективними для застосування у складних промислових умовах [20]. Усе це обґрунтовує необхідність подальших досліджень, спрямованих на уточнення характеристик течії в криволінійних каналах і розробку методик експериментальної перевірки чисельних та теоретичних моделей з урахуванням впливу вимірювальної апаратури.

Мета. Метою роботи є аналіз впливу вимірювальних приладів на характеристики течії у вихорокамерних насосах та зіставлення отриманих експериментальних результатів із параметрами незбуреного потоку.

Результати досліджень. Вихорокамерний насос (ВКН) належить до класу струминних насосів і поєднує ключові переваги струминної техніки, зокрема високу надійність, тривалий ресурс експлуатації та універсальність щодо перекачування різноманітних середовищ [2; 15; 16]. Підвищення коефіцієнта корисної дії порівняно з прямооточними струминними насосами забезпечується завдяки використанню відцентрової сили, яка сприяє формуванню зони розрідження поблизу осі обертання потоку у вихровій камері та підвищенню надлишкового тиску на її периферії.

Конструктивно розрізняють два типи ВКН, що реалізують різні робочі процеси: відведення середовища через осьовий дренажний канал; всмоктування потоків через два осьові канали. У даному дослідженні розглядається насос другого типу. Передбачається, що вплив вимірювального інструменту на структуру течії є подібним для обох конструкцій, тому висновки щодо співвідношення розмірів інструменту з габаритами вихрової камери та осьових каналів не залежать від конкретного робочого процесу. Конструктивні особливості та експлуатаційні характеристики насосів наведено у працях [16; 18; 19].

Методологія дослідження включала два етапи: чисельне моделювання течії у модельному насосі; порівняльний аналіз характеристик потоку, а також локальних значень швидкості та тиску у зонах розташування вимірювального інструменту.

Математичне моделювання виконано із застосуванням методів обчислювальної гідродинаміки (CFD – Computational Fluid Dynamics). Використано модель, що включає рівняння Нав'є–Стокса, осереднені за Рейнольдсом (RANS), рівняння нерозривності та рівняння турбулентності у формулюванні SST-моделі (Shear Stress Transport) [19; 21]. Для підвищення точності визначення вакууму в зоні поблизу осі обертання потоку застосовано поправки, що враховують кривизну ліній струму та ефекти обертання [22; 23].

Для реалізації математичної моделі течії застосовувався програмний комплекс Ansys CFX [24]. Його верифікація, а також оцінка адекватності використаної математичної моделі для вихорокамерних насосів наведені у працях [19; 25] на основі порівняння результатів чисельного моделювання з експериментальними даними.

Розрахунки виконувалися як у стаціонарній, так і в нестаціонарній постановках. Число Куранта-Фрідрікса-Леві обмежувалося значенням не більше 0,5. Для дискретизації застосовувався метод контрольних об'ємів. Чисельні схеми мали другий порядок точності. Критерієм завершення ітераційного процесу було досягнення гранично малих значень залишкових нев'язок рівнянь, а також стабілізація витрати за ітераціями або у часі.

Розрахункова сітка мала неструктуровану конфігурацію, сформовану з тетраедральних елементів із додаванням призматичних шарів у приконттактних зонах поблизу твердих стінок. Мінімально достатній розмір сітки визначався на

основі аналізу результатів для чотирьох варіантів: 1, 3, 6 та 12 млн. елементів. Оскільки інтегральні характеристики, починаючи з сітки у 3 млн. елементів, відрізнялися менш ніж на 1 %, для подальших розрахунків було прийнято саме цей варіант. Додатково контролювалося значення y^+ , яке не перевищувало 4 [26].

На вході в канал задавався повний тиск в якості граничної умови. Для двох осьових каналів та вихідного каналу застосовувалася відкрита гранична умова з нульовим відносним статичним тиском (рис. 1) [27]. Тверді стінки моделі описувалися умовою прилипання (no-slip) із нульовою швидкістю. Для вхідного каналу, що імітував вимірювальний інструмент, використовувалася відкрита границя зі статичним тиском, рівним тиску у вихровій камері, значення якого визначалося в процесі розрахунку. Робочим середовищем була вода з густиною 997 кг/м³.

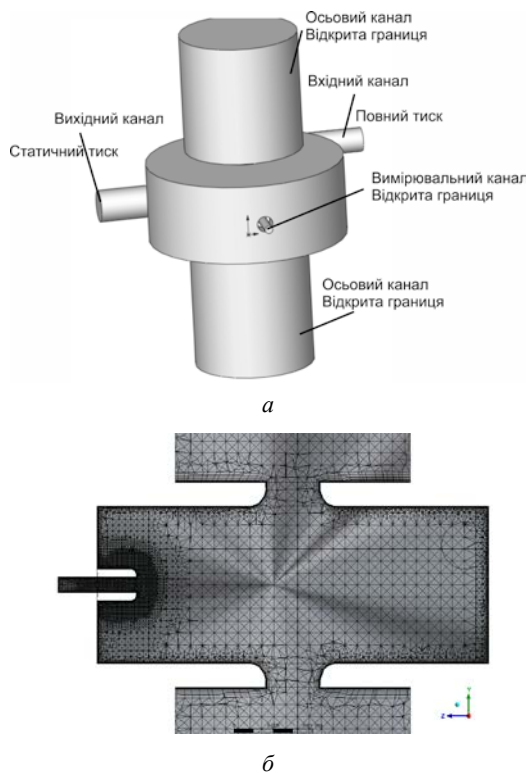


Рис. 1. Вихорокамерний насос:
а – розрахункова модель; б – сіткова модель

На рис. 1 наведено розрахункову схему ВКН у вигляді твердотільної моделі та сітка, що використана.

Інструмент встановлювався у меридіональній площині через отвір у торцевій кришці насоса на відстані половини радіуса вихрової камери, а також на бічній поверхні камери [28]. Аналізувався вплив відносного розміру інструменту на гідродинамічні характеристики, структуру течії та локальні значення швидкості й тиску в точках вимірювання. Діаметр інструменту нормувався відносно діаметра горла вихрової камери.

Аналіз рис. 2 показує, що відсутність інструменту забезпечує найбільш рівномірний розподіл швидкості з мінімальними зонами збурення потоку.

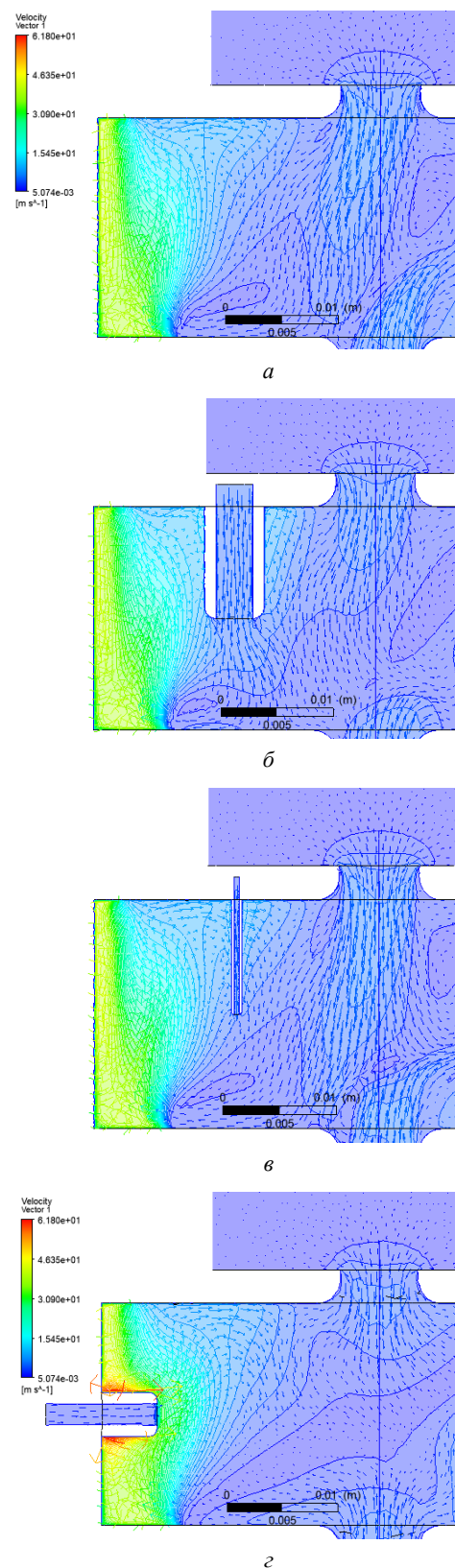


Рис. 2. Розподіл швидкості у меридіональній площині вихорокамерного насоса:
а – без вимірювального інструменту; б – з інструментом, встановленим у торцевій кришці $\bar{d} = 0,75$;
в – з інструментом, встановленим у торцевій кришці камери $\bar{d} = 0,125$; г – з інструментом, розташованим на бічній поверхні камери $\bar{d} = 0,5$

Введення датчика відносним діаметром 0,75 від діаметра горла суттєво змінює картину: з'являються локальні області підвищеної швидкості та порушення симетрії потоку. Менший датчик 0,125 впливає менш агресивно, але все ж формує помітні зони прискорення поблизу своєї поверхні. Конфігурація вимірювального інструменту у бічній поверхні створює концентровані високошвидкісні ділянки, що може призвести до похибок у вимірюваннях. Таким чином, розмір і форма інструменту критично впливають на гідродинаміку, що слід враховувати при плануванні експериментів.

У базовому випадку (рис. 3, а) розподіл швидкості у вихровій камері зберігає відносну симетрію: максимальні значення спостерігаються біля периферії, а в центрі формується стійке вихрове ядро [29]. Введення інструменту 0,75 відносного діаметру (рис. 3, б) суттєво змінює структуру потоку. Характер розподілу швидкостей у цьому випадку подібний до обтікання круглого циліндра: виникають локальні прискорення на обтічній стороні та зони відриву за інструментом, що призводить до підвищеної швидкості, турбулентності та асиметрії потоку. Для інструменту 0,125 (рис. 3, в) вплив менш виражений, однак спостерігається локальне викривлення ліній течії поблизу датчика, що також може вплинути на точність вимірювань. Для інструменту в бічній поверхні вихрової камери (рис. 3, г) спостерігаються найбільші спотворення: формуються високошвидкісні ділянки біля верхньої торцевої стінки та значне перерозподілення потоку в центральній зоні. Це пояснюється тим, що додаткові елементи конструкції змінюють умови обтікання, посилюючи вторинні течії [30]. Таким чином, геометрія та розташування вимірювального інструменту є критичними факторами, що визначають гідродинамічну картину у вихровій камері та можуть суттєво впливати на результати експериментів.

На рис. 4 наведено карти різниці швидкості відносно базового випадку без інструменту, що дозволяє оцінити ступінь спотворення потоку.

У першій конфігурації, коли інструмент встановлено у торцевій кришці (рис. 4, а), спостерігається найбільший локальний вплив: у зоні його розташування формуються області зростання швидкості до 0,28 м/с, що характерно для обтікання циліндричного тіла. Це призводить до зміщення вихрового ядра та появи зон відриву за інструментом. Друга конфігурація, також із розташуванням у торцевій частині камери (рис. 4, б), демонструє подібну картину, але з менш вираженими градієнтами, що свідчить про залежність ефекту від точного положення та геометрії елемента. Третій випадок (інструмент на бічній поверхні камери) характеризується більш рівномірним, але просторово розширеним впливом: зміни швидкості охоплюють периферійну зону, формуючи асиметрію потоку та додаткові вторинні течії (рис. 4, в). Отримані результати підтверджують, що навіть відносно невеликі вимірювальні елементи здатні суттєво змінювати гідродинамічну структуру вихрової камери, що необхідно враховувати при плануванні експериментів і розробці корекційних методик.

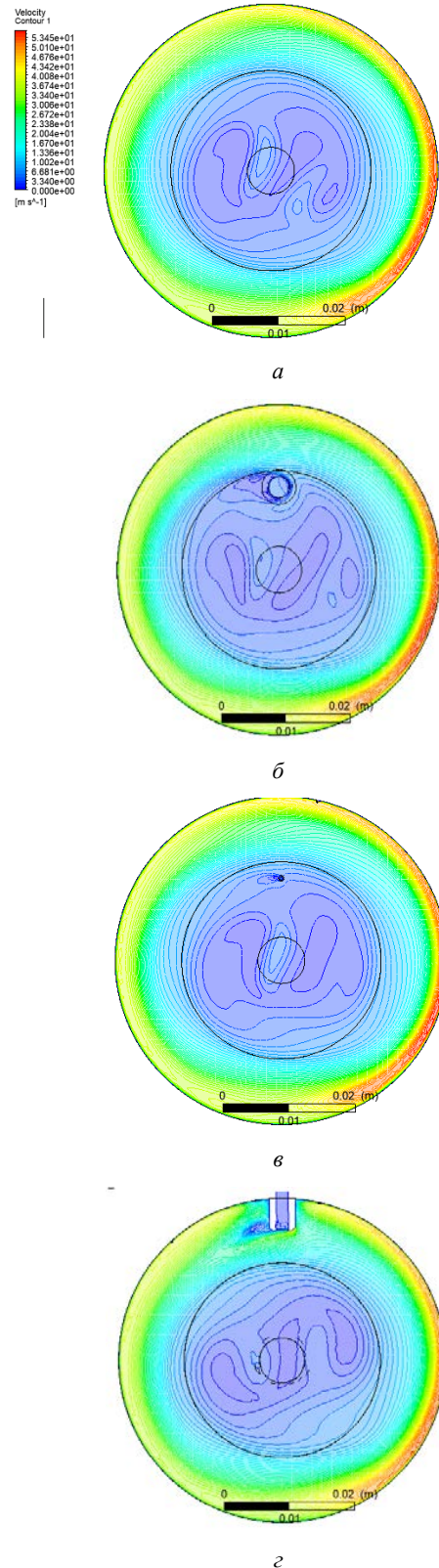


Рис. 3. Розподіл швидкості у вихровій камері вихрокамерного насоса в горизонтальній площині, що проходить через середину її висоти: а – без вимірювального інструменту; б – з інструментом, встановленим у торцевій кришці $\bar{d} = 0,75$; в – з інструментом, встановленим у торцевій кришці камери $\bar{d} = 0,125$; г – з інструментом, розташованим на бічній поверхні камери $\bar{d} = 0,5$

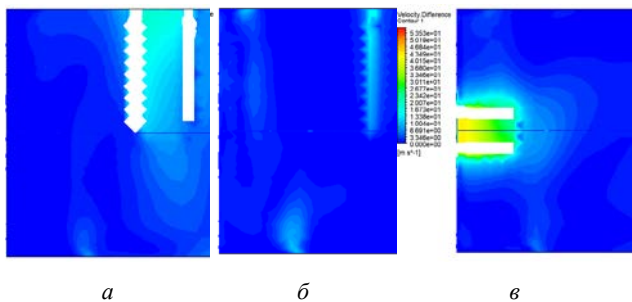


Рис. 4. Різниця у розподілах швидкості у меридіональній площині у порівнянні з розподілом швидкості без інструменту:

a – з інструментом, встановленим у торцевій кришці

$\bar{d} = 0,75$; b – з інструментом, встановленим у торцевій кришці камери $\bar{d} = 0,125$; v – з інструментом, розташованим на бічній поверхні камери $\bar{d} = 0,5$

Критерій λ_2 використовується для виявлення вихрових структур у тривимірних течіях [31]. Він базується на аналізі тензора градієнта швидкості та визначається як друге власне значення симетризованої частини добутку тензора деформацій і обертання [32]. Области, де $\lambda_2 < 0$, відповідають зонам домінування вихрового руху над деформаційним, тобто місцям формування стабільних вихорів. На рис. 5 показано ізоповерхні критерію λ_2 у вихорокамерному насосі за різних конфігурацій вимірювального інструменту. У базовому випадку (рис. 5, a) без інструменту структура вихорів є симетричною: основний тороїдальний вихор охоплює об'єм камери, формуючи характерну спіральну зону рециркуляції. Встановлення інструменту в торцевій кришці (рис. 5, b, v) призводить до локального порушення симетрії поля λ_2 – біля торця з'являються додаткові зони з підвищеним градієнтом в'язкості, що вказує на посилення турбулентних флуктуацій. При розташуванні інструменту на бічній поверхні (рис. 5, z) спостерігається суттєва деформація головного вихору, із його частковим зміщенням і зменшенням інтенсивності λ_2 у центральній частині камери. Це свідчить, що присутність інструменту змінює динаміку вторинних течій, впливаючи на енергію вихорів і стабільність рециркуляційних структур.

Для розуміння впливу інструменту на гідродинаміку течії у насосі доцільно використати такий безрозмірний показник, як інтенсивність турбулентності [33]. Він характеризує рівень пульсацій швидкості відносно середнього потоку [34]. Значення інтенсивності турбулентності варіюються від 0 (ламінальний режим) до 1 (максимальна турбулентність). Аналіз рис. 6 показує, що розташування вимірювального інструмента суттєво змінює структуру потоку у вихорокамерному насосі. Без інструмента потік більш симетричний, з високими значеннями інтенсивності турбулентності у центрі.

Монтаж вимірювального інструменту у торцевій кришці (відносний діаметр 0,75) створює локальні зони зниження інтенсивності турбулентності, але підвищує турбулентність на периферії (рис. 6, b) відразу за інструментом.

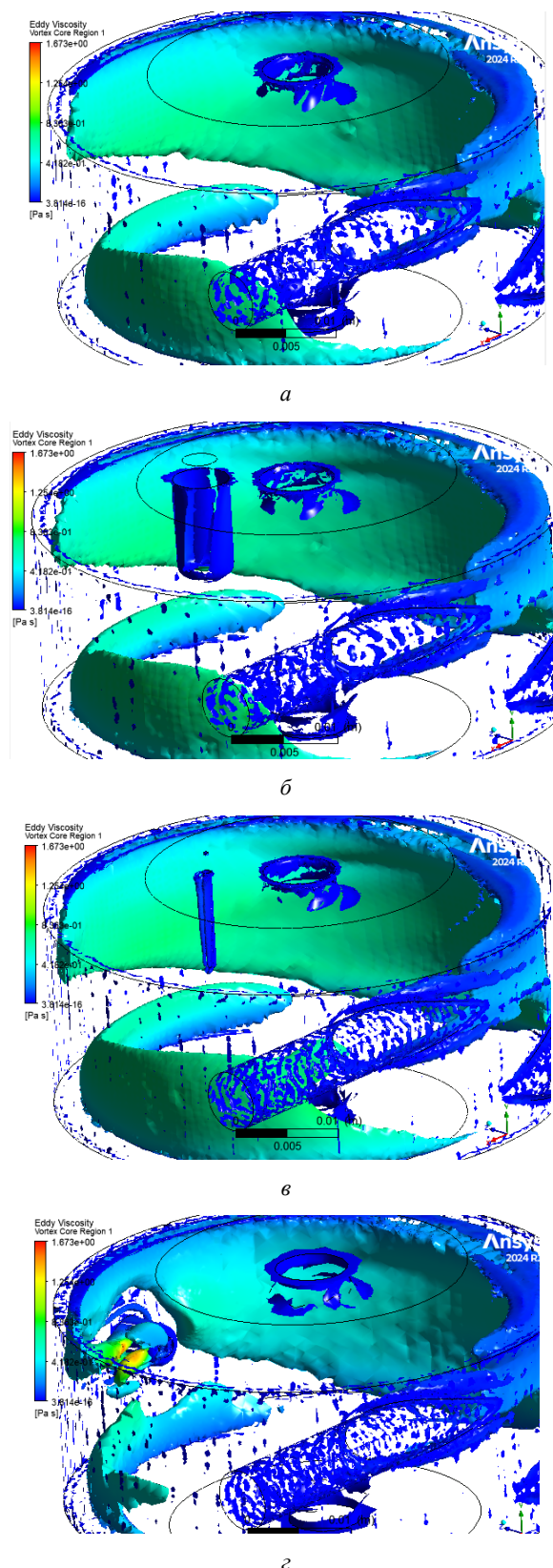


Рис. 5. Розподіл ізоповерхонь λ_2 -критерію у вихровій камері вихорокамерного насоса:

a – без вимірювального інструменту; b – з інструментом, встановленим у торцевій кришці $\bar{d} = 0,75$;

v – з інструментом, встановленим у торцевій кришці камери $\bar{d} = 0,125$; z – з інструментом, розташованим на бічній поверхні камери $\bar{d} = 0,5$

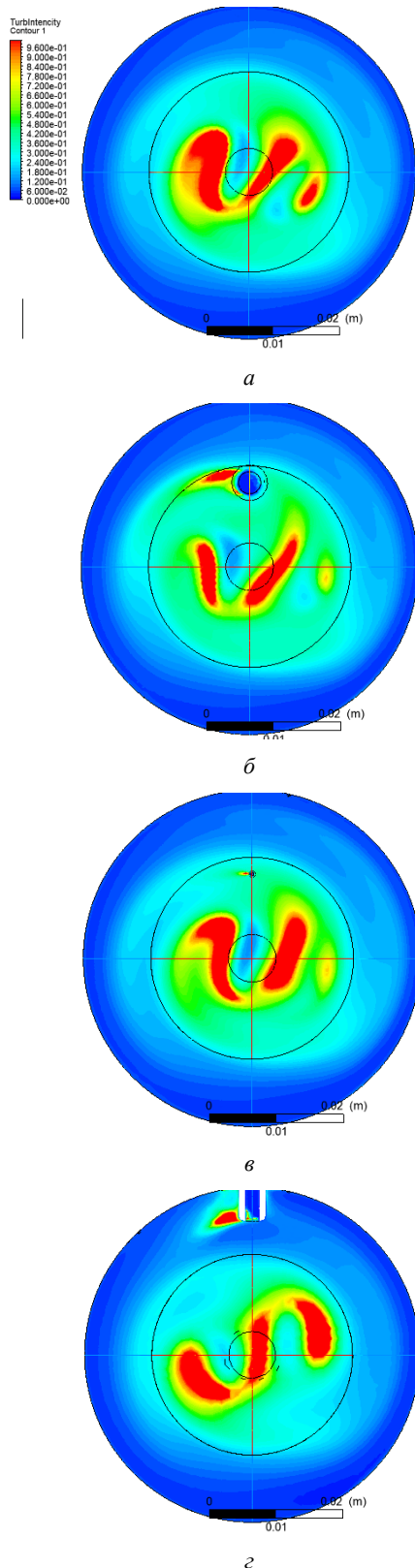


Рис. 6. Розподіл швидкості у вихровій камері вихорокамерного насоса в горизонтальній площині, що проходить через середину її висоти:
 а – без вимірювального інструменту; б – з інструментом, встановленим у торцевій кришці $\bar{d} = 0,75$;
 в – з інструментом, встановленим у торцевій кришці камери $\bar{d} = 0,125$; г – з інструментом, розташованим на бічній поверхні камери $\bar{d} = 0,5$

При розташуванні інструмента з відносним діаметром 0,125 зміни в інтенсивності турбулентності значно мінімізуються, що видно на рис. 6, в. Розташування на бічній поверхні викликає найбільшу асиметрію, концентруючи турбулентність з одного боку. На рис. 6, г видно дві червоні зони високої інтенсивності, сконцентровані з одного боку камери, тоді як протилежна сторона залишається переважно синьою. Це відбувається через локальне утворення вихорів і перерозподіл енергії турбулентності навколо перешкоди. Бічне розташування створює нерівномірний тиск і швидкісні градієнти, що формують інтенсивні вихори лише в одній частині камери, порушуючи рівномірність потоку. Інструмент є фактором, що змінює гідродинаміку системи.

Вимірювання через отвори в торцевих кришках вихрової камери майже не впливають на енергетичні характеристики насоса: погіршення не перевищує 5 % у широкому діапазоні зміни відносного діаметра інструмента, що знаходиться в межах похибки (табл. 1).

Таблиця 1 – Вплив інструменту на енергетичні показники роботи ВКН

Параметр	КК Д	Тиск на виході з насосу	Витрата середовища, що перекачується
Без інструменту	1,0	1,0	1,0
Інструмент діаметром $\bar{d} = 0,5$ розташовано на торцевій кришці	0,96	1,0	0,96
Інструмент діаметром $\bar{d} = 0,5$ розташовано на бічній поверхні	0,79	0,92	0,855
Інструмент діаметром $\bar{d} = 1,0$ розташовано на бічній поверхні	0,32	0,76	0,42

Натомість встановлення інструмента на бічній поверхні є неприпустимим через суттєве зниження ефективності роботи ВКН, що свідчить про значні похибки вимірювань. Використання інструмента в такому положенні може знизити ККД насоса до 68 % через порушення течії. Зменшення відносного діаметра інструмента зменшує збурення потоку, але для мінімізації впливу необхідно забезпечити дуже малий відносний розмір, що складно реалізувати під час експериментів і потребує значного збільшення габаритів моделі насоса.

На рис. 7 показано вплив відносного діаметра вимірювального інструмента на основні енергетичні характеристики ВКН, а також наведено значення швидкості та тиску в точці вимірювання. На рисунку наведено значення для розташування інструменту тільки у верхній торцевій стінці в залежності від відносного діаметра датчика. З графіка видно, що більшість параметрів залишаються практично незмінними, а зниження тиску в точці вимірювання становить близько 10 %. Це свідчить про те, що розмір інструмента майже не впливає на загальні енергетичні

показники ВКН, у випадку розташування у торцевій стінці. Для забезпечення точності вимірювань необхідно дотримуватися співвідношення розмірів камери та інструмента так, щоб його відносний діаметр не перевищував 0,25 діаметра горла камери. Єдиний параметр, на який інструмент впливає суттєво, це обертальна компонента швидкості в точці вимірювання. Причина полягає в тому, що рідина в каналі інструмента не встигає набрати обертальну швидкість основного потоку. Значення цієї компоненти наведені в табл. 2.

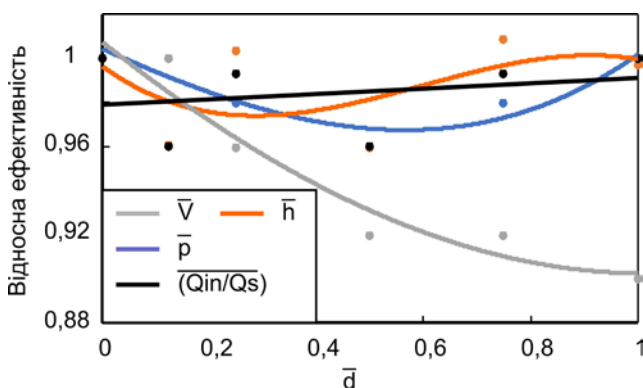


Рис. 7. Залежність інтегральних показників роботи ВКН від відносного діаметра вимірювального інструмента, що розташовано у торцевій кришці

Таблиця 2 – Зміна відносної тангенціальної швидкості в точці виміру

$\bar{d}$	0,125	0,25	0,5	0,75	1,0
$\bar{V}_r$	1,0	1,0	1,0	0,67	0,66

Аналіз рис. 7 та табл. 2 показує, що повна швидкість у точці вимірювання практично не залежить від наявності вимірювального інструмента, проте обертальна компонента істотно зменшується. Це свідчить про значну похибку при визначенні цієї складової швидкості. Для підвищення точності вимірювання обертальної компоненти необхідно орієнтувати інструмент перпендикулярно до напрямку досліджуваної складової.

Висновки. В роботі проаналізовано вплив вимірювальних приладів на характеристики течії у вихорокамерних насосах та порівняно отримані результати із параметрами незбуреного потоку.

1. Контактний вимірювальний інструмент змінює локальну структуру течії у ВКН; ступінь впливу визначається місцем установлення та відносним діаметром зонда. Монтаж у торцевій кришці забезпечує мінімальне спотворення інтегральних показників (погіршення $\leq 5\%$), що можна вважати прийнятним у межах експериментальної похибки.

2. Розміщення інструмента на бічній поверхні є неприйнятним: зростають асиметрія полів швидкості, інтенсивність турбулентності та втрати, а ККД може зменшуватися до 0,32 від базового рівня.

3. Карти різниці швидкостей, ізоповерхні λ_2 -критерію та поля інтенсивності турбулентності є інформативними діагностиками збурення, зокрема

фіксують зміщення вихрового ядра та вторинні течії поблизу зонда.

4. Під час вимірювання єдиним параметром, що системно занижувався, була тангенціальна компонента швидкості через недостатнє «закручування» потоку в каналі інструмента.

5. Для забезпечення коректності вимірювань доцільно дотримуватися обмеження відносного діаметра зонда $\leq 0,25$ та орієнтувати приймач перпендикулярно до досліджуваної компоненти швидкості. Запропоновані рекомендації слід враховувати під час проектування стендів, планування серій вимірювань і узгодження CFD-результатів із експериментом.

Список літератури

- Rogovyi A., Voronova Ye. Comparative analysis of performance characteristics of jet vortex type superchuges. *Автомобільний транспорт*. 2016. Вип. 38. С. 93–98.
- Rogovyi A. Use of detached-eddy simulation method (DES) in calculations of the swirled flows in vortex apparatuses. *Teka. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture*. 2016. Vol. 16, no. 3. P. 57–62.
- Mrózek L., Sláma V., Sedlák K., Tajč L. Analysis of losses in steam turbine control valves. *AIP Conference Proceedings*. 2021. Vol. 2323, issue 1. P. 060003. doi: 10.1063/5.0042097
- Alert R., Casademunt J., Joanny J. F. Active turbulence. *Annual Review of Condensed Matter Physics*. 2022. Vol. 13. P. 143–170. doi: 10.1146/annurev-conmatphys-082321-035957
- Mendes L. P., Ricardo A. M., Bernardino A. J., Ferreira R. M. A comparative study of optical flow methods for fluid mechanics. *Experiments in Fluids*. 2022. Vol. 63. A. no. 7. doi: 10.1007/s00348-021-03357-7
- Neogi A., Mohanta H. K., Sande P. C. Particle image velocimetry investigations on multiphase flow in fluidized beds: a review. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2023. Vol. 89. P. 102309. doi: 10.2139/ssrn.4272172
- Brazhenko V., Mochalin I., Cai J. DIY-PIV system for Poiseuille flow investigation in undergraduate fluid mechanics course. *International Journal of Mechanical Engineering Education*. 2025. Vol. 53, issue 2. P. 373–390. doi: 10.1177/03064190241228440
- Роговий А. С., Дранковський В. Е., Тиньянов О. Д., Азаров А. С. Проектування оборотної гідромашини засобами Ansys та дослідження течії у насосному режимі. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv : NTU "KhPI". 2024. No. 2. P. 73–81. doi: 10.20998/2411-3441.2024.2.11
- Turecký P., Mrózek L., Tajč L., Kolovratník M. Analysis of pressure losses in the diffuser of a control valve. *The European Physical Journal Web of Conferences*. 2017. Vol. 143. P. 02135. doi: 10.1051/epjconf/201714302135
- Rogovyi A., Azarov A., Kukhtenkov Y., Avershyn A., Khovanskyi S. Improving the Performance of a Centrifugal Compressor Through Computer-Aided Design and Optimization of Blade Thickness. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII: Proc. of the 7th Int. Conf. on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2024. Vol. 2: Mechanical and Materials Engineering (4–7 June 2024, Pilsen, Czech Republic)*. Cham : Springer, 2024. P. 324–333. doi: 10.1007/978-3-031-63720-9_28
- Pereira F. S., Eça L., Vaz G., Girimaji S. S. On the simulation of the flow around a circular cylinder at $Re = 140,000$. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019. Vol. 76. P. 40–56. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.01.007
- Groni M., Elaskar S., Mirasso A. E. Scale-adaptive simulation of flow around a circular cylinder near a plane boundary. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2018. Vol. 11, no. 6. P. 1477–1488. doi: 10.29252/jafm.11.06.29036
- Zhou X., Wang J., Hu Y. Experimental investigation on the flow around a circular cylinder with upstream splitter plate. *Journal of Visualization*. 2019. Vol. 22. P. 683–695. doi: 10.1007/s12650-019-00560-x

14. Khalatov A. A., Kovalenko G. V., Meyris A. J. Heat transfer at the cross flow of a tube with an artificial asymmetry. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2017. Vol. 39, no. 4. P. 27–32. doi: 10.31472/ihe.4.2017.04
15. Сьомін Д. О., Роговий А. С. Вплив умов входу середовища, що перекачується, на енергетичні характеристики вихрекамерних насосів. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv : NTU "KhPI". 2015. No. 3 (1112). P. 130–136.
16. Роговий А. С. Концепція створення вихоркамерних нагнітачів та принципи побудови систем на їх основі. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Северодонецьк : Вид-во СНУ ім. Володимира Даля. 2017. № 3 (233). С. 168–173.
17. Syomin D., Rogovyi A. Mathematical simulation of gas bubble moving in central region of the short vortex chamber. *Teka. Commission of motorization and energetics in agriculture*. 2012. Vol. 12, no. 4. P. 279–284.
18. Rogovyi A., Lukianets S., Krasnikov S., Hrechka I., Shudryk O. Energy characteristics of the oil vortex chamber supercharger. *Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes*. Cham : Springer, 2023. P. 561–570. doi: 10.1007/978-3-031-42778-7_52
19. Rogovyi A., Krasnikov S., Timchenko Y., Viunyk O., Sushko S. Use of a guide vane apparatus for swirling axial flow in vortex chamber pumps. *AIP Conference Proceedings*. 2025. Vol. 3428, issue 1. P. 020013. doi: 10.1063/1.5138603
20. Kondus V., Andrusiak V., Sotnyk M., Polkovnychenko V., Mushtai M. The Influence of the Impeller Inter-blade Channels Roughness on the Energy Parameters of the Submersible Pump. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII: Proc. of the 7th Int. Conf. on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2024. Vol. 2: Mechanical and Materials Engineering (4–7 June 2024, Pilsen, Czech Republic)*. Cham : Springer, 2024. P. 253–270. doi: 10.1007/978-3-031-63720-9_22
21. Xiao J., Wu Q., Chen L., Ke W., Wu C., Yang X., Jiang H. Assessment of different CFD modeling and solving approaches for a supersonic steam ejector simulation. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13, issue 1. P. 144. doi: 10.3390/atmos13010144
22. Huang H., Sun T., Li N., Zhang G. Sensitization of the modified SST model to the swirling and curvature for turbulent impinging jet heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. Vol. 182. P. 121980. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121980
23. Park J., Kim D. H., Lee S., Park J. S. Analysis of axisymmetric base flows with compressibility and rotation/curvature corrections to turbulence model. *Journal of Computational Fluids Engineering*. 2024. Vol. 29, issue 4. P. 204–216. doi: 10.6112/ksce.2024.29.4.204
24. ANSYS, C. R24.1 Help manual. ANSYS Inc. 2024.
25. Sharapov S., Chekh O., Husiev D., Klymenko V., Shaparenko O. Increasing Boiling Flow Efficiency from Motive Nozzles of Two-Phase Ejectors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1180, no. 1. P. 012059.
26. Kumar P., Mahesh K. A method to determine wall shear stress from mean profiles in turbulent boundary layers. *Experiments in Fluids*. 2022. Vol. 63. A. no. 6. doi: 10.1007/s00348-021-03352-y
27. Mueller T. R., Vogt D. M., Fischer M., Phillipsen B. A. On the far-field boundary condition treatment in the framework of aeromechanical computations using ANSYS CFX. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A: Journal of Power and Energy*. 2020. Vol. 235, issue 5. P. 1103–1118. doi: 10.1177/09575650920962698
28. Wallace J. M., Vukoslavčević P. V. Measurement of the velocity gradient tensor in turbulent flows. *Annual review of fluid mechanics*. 2010. Vol. 42. P. 157–181. doi: 10.1146/annurev-fluid-121108-145445
29. Mardani A., Asadi B., Beige A. A. Investigation of flame structure and precessing vortex core instability of a gas turbine model combustor with different swirler configurations. *Physics of Fluids*. 2022. Vol. 34, issue 8. P. 085129. doi: 10.1063/5.0097430
30. Резва К. С., Дранковский В. Е., Шевцов В. М., Оспіщева Л. О. Застосування методів математичного моделювання при чисельному дослідженні гідродинамічних характеристик високонапірної оборотної гидромашини. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv : NTU "KhPI". 2020. No. 1. P. 46–52.
31. Zhang Y. N., Qiu X., Chen F. P., Liu K. H., Dong X. R., Liu C. A selected review of vortex identification methods with applications. *Journal of Hydrodynamics*. 2018. Vol. 30, issue 5. P. 767–779. doi: 10.1007/s42241-018-0112-8
32. Dehdarnejad E., Bayareh M. Analysis of the vortical flow in a cyclone using four vortex identification methods. *Powder Technology*. 2023. Vol. 428. P. 118897. doi: 10.1016/j.powtec.2023.118897
33. Belabes B., Paraschivoiu M. Numerical study of the effect of turbulence intensity on VAWT performance. *Energy*. 2021. Vol. 233. P. 121139. doi: 10.1016/j.energy.2021.121139
34. Srikanth H. V., Kesavan M. Numerical Simulations of Flow and Flame Characteristics of Double Cavity Trapped Vortex Combustor. *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*. 2024. Vol. 18, no. 4. P. 835–845. doi: 10.59038/jjmie/180415

References (transliterated)

1. Rogovyi A., Voronova Ye. Comparative analysis of performance characteristics of jet vortex type superchargers. *Avtomobil'nyy transport*. 2016, issue 38, pp. 93–98.
2. Rogovyi A. Use of detached-eddy simulation method (DES) in calculations of the swirled flows in vortex apparatuses. *Teka. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture*. 2016, vol. 16, no. 3, pp. 57–62.
3. Mrózek L., Sláma V., Sedláč K., Tajč L. Analysis of losses in steam turbine control valves. *AIP Conference Proceedings*. 2021, vol. 2323, issue 1, p. 060003. doi: 10.1063/5.0042097
4. Alert R., Casademunt J., Joanny J. F. Active turbulence. *Annual Review of Condensed Matter Physics*. 2022, vol. 13, pp. 143–170. doi: 10.1146/annurev-conmatphys-082321-035957
5. Mendes L. P., Ricardo A. M., Bernardino A. J., Ferreira R. M. A comparative study of optical flow methods for fluid mechanics. *Experiments in Fluids*. 2022, vol. 63, a. no. 7. doi: 10.1007/s00348-021-03357-7
6. Neogi A., Mohanta H. K., Sande P. C. Particle image velocimetry investigations on multiphase flow in fluidized beds: a review. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2023, vol. 89, p. 102309. doi: 10.2139/ssrn.4272172
7. Brazhenko V., Mochalin L., Cai J. DIY-PIV system for Poiseuille flow investigation in undergraduate fluid mechanics course. *International Journal of Mechanical Engineering Education*. 2025, vol. 53, issue 2, pp. 373–390. doi: 10.1177/03064190241228440
8. Rogovyi A. S., Drankovskyi V. E., Tynianov O. D., Azarov A. S. Proyektuvannya oborotnoyi hidromashyny zasobamy Ansys ta doslidzhennya techiyi u nasosnomu rezhymi [Designing a reversible hydraulic machine with Ansys and studying the flow in the pumping mode]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2024, no. 2, pp. 73–81. doi: 10.20998/2411-3441.2024.2.11
9. Turecký P., Mrózek L., Tajč L., Kolovratnik M. Analysis of pressure losses in the diffuser of a control valve. *The European Physical Journal Web of Conferences*. 2017. Vol. 143. P. 02135. doi: 10.1051/epjconf/201714302135
10. Rogovyi A., Azarov A., Kukhtenkov Y., Avershyn A., Khovanskyi S. Improving the Performance of a Centrifugal Compressor Through Computer-Aided Design and Optimization of Blade Thickness. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII: Proc. of the 7th Int. Conf. on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2024. Vol. 2: Mechanical and Materials Engineering (4–7 June 2024, Pilsen, Czech Republic)*. Cham, Springer Publ., 2024, pp. 324–333. doi: 10.1007/978-3-031-63720-9_28
11. Pereira F. S., Eça L., Vaz G., Girimaji S. S. On the simulation of the flow around a circular cylinder at Re = 140,000. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019, vol. 76, pp. 40–56. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.01.007
12. Gironi M., Elaskar S., Mirasso A. E. Scale-adaptive simulation of flow around a circular cylinder near a plane boundary. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2018, vol. 11, no. 6, pp. 1477–1488. doi: 10.29252/jafm.11.06.29036
13. Zhou X., Wang J., Hu Y. Experimental investigation on the flow around a circular cylinder with upstream splitter plate. *Journal of Visualization*. 2019, vol. 22, pp. 683–695. doi: 10.1007/s12650-019-00560-x

14. Khalatov A. A., Kovalenko G. V., Meyris A. J. Heat transfer at the cross flow of a tube with an artificial asymmetry. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2017, vol. 39, no. 4, pp. 27–32. doi: 10.31472/ihe.4.2017.04
15. Syomin D. O., Rogovyi A. S. Vplyv umov vkhodu seredovyshcha, shcho perekachuyet'sya, na enerhetychni kharakterystyky vykhrekamernykh nasosiv [The influence of the inlet conditions of the pumped medium on the energy characteristics of vortex chamber pumps]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 3 (1112), pp. 130–136.
16. Rogovyi A. S. Kontseptsiya stvorenniya vykhorokamernykh nahnitachiv ta pryntsyipy pobudovy system na yikh osnovi [The concept of vortex chamber superchargers creation and the principle of systems designing on their basis]. *Visnyk Shkhydroukrayins'koho natsional'noho universytetu imeni Volodymyra Dalya* [Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian national university]. Severodonetsk, SNU named after Volodymyr Dahl Publ., 2017, no. 3 (233), pp. 168–173.
17. Syomin D., Rogovyi A. Mathematical simulation of gas bubble moving in central region of the short vortex chamber. *Teka. Commission of motorization and energetics in agriculture*. 2012, vol. 12, no. 4, pp. 279–284.
18. Rogovyi A., Lukianets S., Krasnikov S., Hrechka I., Shudryk O. Energy characteristics of the oil vortex chamber supercharger. *Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes*. Cham, Springer Publ., 2023, pp. 561–570. doi: 10.1007/978-3-031-42778-7_52
19. Rogovyi A., Krasnikov S., Timchenko Y., Viunyk O., Sushko S. Use of a guide vane apparatus for swirling axial flow in vortex chamber pumps. *AIP Conference Proceedings*. 2025, vol. 3428, issue 1, p. 020013. doi: 10.1063/1.510038603
20. Kondus V., Andrusiak V., Sotnyk M., Polkovnychenko V., Mushtai M. The Influence of the Impeller Inter-blade Channels Roughness on the Energy Parameters of the Submersible Pump. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII: Proc. of the 7th Int. Conf. on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2024. Vol. 2: Mechanical and Materials Engineering (4–7 June 2024, Pilsen, Czech Republic)*. Cham, Springer Publ., 2024, pp. 253–270. doi: 10.1007/978-3-031-63720-9_22
21. Xiao J., Wu Q., Chen L., Ke W., Wu C., Yang X., Jiang H. Assessment of different CFD modeling and solving approaches for a supersonic steam ejector simulation. *Atmosphere*. 2022, vol. 13, issue 1, p. 144. doi: 10.3390/atmos13010144
22. Huang H., Sun T., Li N., Zhang G. Sensitization of the modified SST model to the swirling and curvature for turbulent impinging jet heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022, vol. 182, p. 121980. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121980
23. Park J., Kim D. H., Lee S., Park J. S. Analysis of axisymmetric base flows with compressibility and rotation/curvature corrections to turbulence model. *Journal of Computational Fluids Engineering*. 2024, vol. 29, issue 4, pp. 204–216. doi: 10.6112/ksce.2024.29.4.204
24. ANSYS, C. *R24.1 Help manual*. ANSYS Inc. 2024.
25. Sharapov S., Chekh O., Husiev D., Klymenko V., Shaparenko O. Increasing Boiling Fluid Flowing Efficiency from Motive Nozzles of Two-Phase Ejectors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021, vol. 1180, no. 1, p. 012059.
26. Kumar P., Mahesh K. A method to determine wall shear stress from mean profiles in turbulent boundary layers. *Experiments in Fluids*. 2022, vol. 63, a. no. 6. doi: 10.1007/s00348-021-03352-y
27. Mueller T. R., Vogt D. M., Fischer M., Phillipsen B. A. On the far-field boundary condition treatment in the framework of aeromechanical computations using ANSYS CFX. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A: Journal of Power and Energy*. 2020, vol. 235, issue 5, pp. 1103–1118. doi: 10.1177/0957650920962698
28. Wallace J. M., Vukoslavčević P. V. Measurement of the velocity gradient tensor in turbulent flows. *Annual review of fluid mechanics*. 2010, vol. 42, pp. 157–181. doi: 10.1146/annurev-fluid-121108-145445
29. Mardani A., Asadi B., Beige A. A. Investigation of flame structure and precessing vortex core instability of a gas turbine model combustor with different swirler configurations. *Physics of Fluids*. 2022, vol. 34, issue 8, p. 085129. doi: 10.1063/5.0097430
30. Ryzva K. S., Drankov'skyi V. E., Shevtsov V. M., Ospishcheva L. O. Zastosuvannya metodiv matematychnoho modelyuvannya pry chysel'nomu doslidzhenni hidrodynamichnykh kharakterystyk vysokonapirnoyi oborotnoyi hydromashyny [The application of methods of mathematical modeling for the numerical research of hydrodynamic characteristics of a high-head reversible hydraulic machine]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2020, no. 1, pp. 46–52.
31. Zhang Y. N., Qiu X., Chen F. P., Liu K. H., Dong X. R., Liu C. A selected review of vortex identification methods with applications. *Journal of Hydrodynamics*. 2018, vol. 30, issue 5, pp. 767–779. doi: 10.1007/s42241-018-0112-8
32. Dehdarnejad E., Bayareh M. Analysis of the vortical flow in a cyclone using four vortex identification methods. *Powder Technology*. 2023, vol. 428, p. 118897. doi: 10.1016/j.powtec.2023.118897
33. Belabes B., Parachioiu M. Numerical study of the effect of turbulence intensity on VAWT performance. *Energy*. 2021, vol. 233, p. 121139. doi: 10.1016/j.energy.2021.121139
34. Srikanth H. V., Kesavan M. Numerical Simulations of Flow and Flame Characteristics of Double Cavity Trapped Vortex Combustor. *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*. 2024, vol. 18, no. 4, pp. 835–845. doi: 10.59038/jjmie/180415

Надійшла (received) 10.10.2025

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

Тімченко Євген Ігорович (Timchenko Yevhen) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; e-mail: yevhen.timchenko@mit.khpi.edu.ua

Нескорожений Артем Олегович (Neskorozhenyi 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

Дьомін Данііл Русланович (Domiin Daniil) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0314-1191>; e-mail: daniil.domin@mit.khpi.edu.ua

Цента Євген Миколайович (Tsenta Yevhen) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», майстер виробничого навчання кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2607-2294>; e-mail: yevhen.tsenta@khpi.edu.ua