

ВІДГУК

офіційного опонента **Бадаха Валерія Миколайовича**
на дисертаційну роботу **Молошного Олександра Миколайовича**
«Вплив конструкції підвідного пристрою герметичного моноблочного насоса з порожнистим валом на його робочий процес та характеристики»,
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
зі спеціальності 05.05.17 – «Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати»

1. Актуальність теми, її зв'язок з науковими програмами, планами, темами.

Наразі екологічним проблемам приділяється велика увага. Це в першу чергу стосується запровадження в потенційно небезпечні технологічні процеси насосного обладнання підвищеної надійності та енергоефективності. В наш час накопичено великий досвід щодо проектування та експлуатації найпоширеніших конструктивних схем насосів, що містять кінцеві ущільнення. Однак, таким конструкціям притаманні недоліки: в будь-якому разі вони потребують змащування, високої кваліфікації обслуговування; вичерпний ресурс елементів ущільнення. Все це спричинює високу вартість життєвого циклу насоса, а подальше вдосконалення конструкції кінцевих ущільнень є складним завданням.

Альтернативним варіантом таким конструкціям є герметичні насоси. Вони зазвичай не містять кінцевих ущільнень. Це дозволяє підвищити їх надійність, знизити витрати протягом періоду їх експлуатації, а найголовніше забезпечити високі екологічні норми при перекачуванні шкідливих або небезпечних речовин. Найпоширенішими конструкціями є насосні агрегати з магнітною муфтою або з гільзованим електричним двигуном. Однак, і ці конструкції мають деякі свої вади, особливо вузли сприйняття осьової сили, а також підвищені електромагнітні втрати в електродвигуні або магнітній муфті.

Подальше вирішення зазначених проблем можливе шляхом розробки нових конструктивних схем герметичних насосних агрегатів з порожнистими валами, які одночасно можуть слугувати підвідними пристроями та елементами опорних вузлів. Реалізація таких схем можлива з виконанням наукових досліджень щодо особливостей робочого процесу герметичних насосів з порожнистим валом. Удосконалення зазначених конструкції герметичних насосів на основі результатів проведення додаткових наукових досліджень з метою підвищення їх надійності та енергоефективності є актуальною проблемою.

Актуальність теми дисертаційного дослідження не підлягає сумніву і у достатній мірі обґрунтована дисертантом у роботі та авторефераті. Дисертаційна робота виконана згідно плану науково-дослідних робіт кафедри прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету відповідно до науково-технічної програми Міністерства освіти і науки України. Окремі положення дисертаційної роботи розроблялися при виконанні науково-дослідної роботи «Дослідження робочих процесів насосів і приводів» (№ ДР 0114U000069). Фізичний експеримент проведено на кафедрі «Основ проектування та рідинних машин» Вроцлавського університету науки і техніки (Польща), що свідчить про зацікавленість результатами дослідження науковців з закордону.

2. Достовірність та ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові положення, висновки та рекомендації, які викладені у дисертаційній роботі Молошого О.М., є логічно обґрунтованими і базуються на глибокому літературному огляді за темою дослідження, використанні у дослідженні фундаментальних положень механіки рідин і газів та теорії турбомашин, застосуванні сучасного методу числового дослідження турбомашин (ANSYS CFX), детальному аналізу отриманих результатів та на їх порівнянні з результатами висновків інших науковців, прискіпливому формуванні висновків. Отримані аналітичні результати та результати числового моделювання порівняно з результатами фізичного експерименту, вони є співставними. Результати проведених досліджень апробовані на численних конференціях і вважаються достовірними та науково обґрунтованими.

3. Новизна наукових положень, результатів та рекомендацій

У дисертації запропоновані та обґрунтовані шляхи удосконалення конструкції герметичного моноблочного насоса з порожнистим валом на основі результатів наукових досліджень впливу особливостей конструкції підшипного пристрою на течію та енергетичні процеси в проточній частині насоса і елементах електродвигуна.

Основними новими науковими результатами є:

- вперше визначено вплив комплексу факторів навантаження ротора (ваги, гідродинамічних та магнітних сил) на робочий процес підшипників ковзання та зворотній зв'язок елементів конструкції підшипників ковзання на гідродинамічні та магнітні складові робочого процесу електродвигуна герметичного моноблочного насоса з порожнистим валом;

- вперше визначено діапазон величин діаметрів осьового підвідного пристрою (ОПП) з точки зору мінімальних гідравлічних втрат в ОПП насоса (n_s в діапазоні 60...70) та електричних втрат в роторних магнітопроводах електродвигуна за умови порожнистого валу;

- вперше досліджено вплив ОПП з обертовими стінками та дифузором перед входом в РК на структуру потоку на вході в РК та визначено параметри розподілення швидкостей за різних конструктивних особливостей ОПП;

- вперше встановлено та описано математично взаємозалежність між величиною діаметра ОПП та крутизною напірної характеристики насоса;

- вперше визначено вплив обертання стінок ОПП з різною швидкістю на протікання кавітаційних процесів в ОПП і РК та встановлено, що перші прояви кавітації спостерігаються в РК, а зменшення діаметру ОПП призводить до зміни місця виникнення кавітації і напрямку її розповсюдження;

- вперше за результатами дослідження структури течії на виході з дифузора ОПП відцентрового насоса з порожнистим валом уточнено рекомендації щодо проектування входної частини лопатей РК;

- уточнено рекомендації щодо проектування герметичного моноблочного відцентрового насоса з порожнистим валом, що вперше враховують основні взаємозалежності геометричних параметрів елементів його проточної та електричної частини.

4. Практична значимість отриманих у роботі результатів

Практична значимість результатів, що отримані в дисертаційній роботі, полягає в наступному:

- уточнено рекомендації щодо проектування герметичного моноблочного відцентрового насоса з порожнистим валом з врахуванням основних взаємозалежностей геометричних параметрів елементів його проточної та електричної частини і гідравлічних та електромагнітних втрат;

- визначено вплив основних геометричних параметрів ОПП на характеристики насоса, що дозволяє прогнозувати крутизну його напірної характеристики при проектуванні;

- сформульовано рекомендації щодо конструктивних геометричних особливостей внутрішніх поверхонь ОПП при їх проектуванні;

- розроблено нові конструктивні схеми герметичних відцентрових моноблочних насосів та отримано 2 патенти України на корисну модель;

- сформульовано рекомендації щодо врахування конструктивних обмежень проточної частини (в тому числі ОГП) при визначенні величини кавітаційного запасу насоса;
- основні результати дослідження були впроваджені в навчальний процес Сумського державного університету та при проектуванні і модернізації насосів, що виробляє ТОВ «Сумський машинобудівний завод», що підтверджено відповідними актами.

5. Повнота опублікованих основних результатів дослідження

Апробацію основних результатів дисертаційної роботи проведено досить широко і повно за участі дисертанта у ряді науково-технічних конференцій, у тому числі міжнародних. Матеріали дисертації опубліковані в 20 наукових працях, серед яких 4 наукових статті у фахових виданнях України, 2 наукові статті у закордонних наукових виданнях (у тому числі 2 статті у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus), отримано 2 патенти України на корисну модель, а також опубліковано 12 тез доповідей на науково-технічних конференціях. Наведений у публікаціях матеріал повною мірою відображає основні отримані результати та обґрунтовує наукові положення дисертаційної роботи.

6. Структура і зміст дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Молошого О.М. представляє собою завершену наукову працю і складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і 8 додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи складає 227 сторінок, з яких 175 сторінок основного тексту. Дисертаційна робота містить 132 рисунки, 24 з яких – у додатках; 14 таблиць, 4 з яких – у додатках; 8 додатків на 21 сторінці, бібліографію зі 188 джерел на 22 сторінках.

У **вступі**, згідно до вимог оформлення дисертаційної роботи та плану її виконання, обґрунтовано актуальність вибору теми дослідження, сформульовано мету та завдання досліджень, визначено її об'єкт і предмет досліджень, описано основні методи досліджень, представлено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** проведено інформаційно-аналітичний огляд літературних джерел за темою дисертаційної роботи.

Визначено передумови та причини створення і розвитку конструкцій герметичних насосів, детально проаналізовано їх основні конструктивні типи, особливості та недоліки. Визначено параметри рідини, що може бути перекачана, та актуальні сфери застосування герметичних насосів.

Проаналізовано вплив підвідних пристроїв насосів на їх робочий процес та кавітаційні явища. Описано особливість структури течії в дифузорі з нерухомими та рухомими стінками і шляхи зниження втрат.

Визначено основні вимоги до конструкції герметичного моноблочного насоса. Встановлено, що перспективною є розробка конструкції насоса двостороннього входу з порожнистим валом.

У **другому розділі** описано основні методи дослідження, що використовувалися в роботі. Предметом дослідження є вплив геометричних параметрів елементів проточної частини та електродвигуна герметичного моноблочного відцентрового насоса з порожнистим валом на його напірні, енергетичні та кавітаційні характеристики, а об'єктом – робочий процес герметичного моноблочного відцентрового насоса з порожнистим валом.

Описано використаних 3 основних методи дослідження: аналітичний, числове моделювання та фізичний експеримент. Аналітичний базується на відомих законах фізики та механіки, що описують робочий процес відцентрового герметичного насоса.

Автор описує основні рівняння, що використовуються при числовому моделюванні в програмному комплексі ANSYS CFX. Описано методику проведення числового моделювання. Для здійснення досліджень були побудовані тривимірні моделі проточної частини герметичного насоса. Зважаючи на симетричність потоків рідини в насосах двостороннього входу автор здійснив спрощення геометрії і розглянув тільки її половину. Здійснено аргументацію вибору k-ε моделі турбулентності течії рідини. Результати отримані з використанням інтерфейсу «Stage» між елементами розрахункової моделі за стаціонарної постановки задачі, що є доцільним.

Для визначення можливості та коректності застосування числового моделювання для дослідження робочого процесу насоса проведено порівняння результатів фізичного експерименту та числового моделювання для 3 варіантів підвідного пристрою герметичного моноблочного насоса. Випробувальний стенд розроблений згідно чинного ДСТУ 6134:2009 «Насоси динамічні. Методи випробування» та побудований на кафедрі «Основ проектування та рідинних машин» Вроцлавського університету науки і техніки (Польща). Приведено методику визначення відносних похибок результатів фізичного експерименту.

Загалом методику дослідження викладено якісно і в достатній мірі.

У **третьому розділі** представлені розроблені конструктивні схеми герметичних моноблочних насосів та результати аналітичних розрахунків їх елементів та вузлів.

Запропонована конструкція герметичного моноблочного насоса має порожнисті вали, на яких розміщені короткозамкнені ротори асинхронних

електродвигунів, при цьому порожнина валу є частиною проточної частини насоса (підвідного пристрою), а підшипники додатково обмежують об'єм рідини, що протікає по контуру охолодження. Дане конструктивне рішення є новим і потребує детального дослідження.

Здобувач проаналізував вплив конструктивних особливостей основних елементів моноблочного насоса на його робочий процес та вибір їх конструктивних параметрів. Визначив: механічні втрати на тертя ротора електродвигуна; особливості впливу робочого процесу електродвигуна на формування габаритів елементів проточної частини насоса; вплив ексцентриситету розташування ротора відносно статора на магнітне притягання; особливості течії рідини в щілині між ротором і статором; гідродинамічні сили, що діють на ротор в зазорі між статором і ротором; залежність величини гідродинамічної сили від ексцентриситету розташування ротора відносно статора; особливості розрахунку валу на жорсткість та міцність при наявності порожнини; параметри підшипників ковзання; осьові магнітні та гідравлічні сили та метод їх сприйняття. На основі здійснених розрахунків визначено основні геометричні параметри елементів герметичного моноблочного насоса та надано рекомендації щодо їх визначення.

Проведені розрахунки дають підстави стверджувати про всебічний аналіз запропонованої конструкції герметичного моноблочного насоса з порожнистим валом.

У **четвертому розділі** представлений аналіз результатів проведеного числового моделювання робочого процесу прототипу герметичного моноблочного насоса з порожнистим валом. Здійснено аналіз структури течії в ОПШ при зміні діаметра прямолінійної ділянки ОПШ, кута розкриття та довжини дифузора та обтічника, форми обтічника, гідравлічних характеристик ОПШ, впливу обертання стінок ОПШ на структуру потоку та розподіл швидкостей на вході в робоче колесо. Застосування раптового розширення на виході з дифузору зменшує колову складову абсолютної швидкості та величину відривних зон в дифузорі. Умова обертання стінок ОПШ призводить до зростання колової складової абсолютної швидкості, значну зміну розподілу осьової складової абсолютної швидкості та зниження коефіцієнту гідравлічного опору ОПШ.

Проведено аналіз кавітаційних процесів в ОПШ та робочому колесі, визначено кавітаційну характеристику прототипу насоса за обертів валу 1450 об/хв та 2900 об/хв, при цьому умова обертання стінок ОПШ в порівнянні з нерухомими не змінює кавітаційні характеристики насоса. Запропонована конструкція насоса за показником кавітаційного коефіцієнта швидкохідності в порівнянні з подібними конструкціями має характеристики вище середніх, що є

гарним показником. Встановлено, що кавітація в робочому колесі з'являється раніше ніж в ОПП, при цьому обертання стінок ОПП спричинює «розмивання» кавітаційної зони.

Проведене числове моделювання дозволило уточнити геометричні параметри прототипу конструкції герметичного моноблочного насоса з порожнистим валом.

У п'ятому розділі представлені результати числового моделювання робочого процесу та фізичного експерименту проведеного на моделі герметичного моноблочного насоса з порожнистим валом на базі яких подані методичні рекомендації щодо проектування насосів такої конструкції.

Автор представив нову модель герметичного моноблочного насоса з уточненими геометричними параметрами. Одним з етапів її дослідження є застосування ребер або канавок на стінках ОПП, при чому для визначення параметрів гвинтової траєкторії здобувач запропонував власні формули.

Розбіжність результатів числового моделювання та фізичного експерименту є в межах допустимого для насосів з коефіцієнтом швидкохідності 60...70. Робочі параметри насоса визначені для обертів валу 1450 об/хв та 2900 об/хв, а отримані результати відповідають модельному перерахунку. Проведені дослідження робочого процесу насоса за різних обертів валу дали можливість комплексно оцінити його робочі характеристики. За отриманими даними встановлено залежність між діаметром прямолінійної ділянки ОПП та крутизною напірної характеристики насоса. Встановлено, що зменшення діаметру ОПП з 65 мм (базовий варіант) до 40 мм за номінальної подачі знижує напір насоса в межах 1%, а подальше зменшення до 32 мм знижує напір насоса в межах 7%.

Визначено діапазон рекомендованих величин діаметрів прямолінійної ділянки ОПП з врахуванням гідравлічних втрат в ОПП та електромагнітних втрат в роторі електричного двигуна, які спричинені не передбаченою розрахунком зміною його геометричних розмірів (внутрішній діаметр ротора).

Особливу увагу приділено визначенню впливу довжини прямолінійної ділянки ОПП та застосуванню ребер та канавок на стінках ОПП (прямолінійної ділянки та дифузора) на структуру течії та характеристики насоса. Їх застосування виявилось малоефективним з точки зору покращення ефективності робочого процесу насоса. Автор рекомендує застосовувати криволінійний профіль конфузора та дифузора для зменшення концентрації ліній течії.

За результатами аналізу отриманих розподілів складових абсолютної швидкості на вході в робоче колесо автором розроблено рівняння для їх

аналітичного визначення та надані рекомендації щодо конструктивних особливостей вхідної кромки лопатей робочого колеса насоса.

Докладно проаналізовано кавітаційні процеси в ОПП та робочому колесі. Встановлено, що застосування запропонованої конструкції ОПП з конусом, прямолінійною ділянкою та дифузором погіршує кавітаційні характеристики насоса в порівнянні з циліндричним підвідним пристроєм та змінює форму кавітаційної зони та напрям її зростання в робочому колесі. Проте, за кавітаційним коефіцієнтом швидкохідності насос з рекомендованими геометричними параметри ОПП відповідає середнім статистичним значенням, що можна вважати допустимим.

Додатково в роботі представлено результати аналізу робочого процесу в нестационарній постановці задачі при числовому моделюванні, що дозволило визначити пульсації напору, пульсації потужності та гідродинамічних сил взаємодії робочого колеса та направляючого апарату.

Як підсумок результатів дисертаційного дослідження представлена таблиця для визначення тенденцій впливу зміни геометричних параметрів конструкції моноблочного герметичного насоса з порожнистим валом на його робочий процес.

Висновки. У роботі надано шість висновків, які підсумовують результати дослідження в цілому. Усі вони у логічному порядку вказують на основні результати дослідження та достатньо повно характеризують науково-практичні досягнення дисертанта.

Дисертаційна робота є закінченою і вирішує поставлені завдання. Зміст, форма подачі матеріалу та стиль викладення відповідають вимогам до кандидатських дисертацій.

7. Ідентичність змісту автореферату основним положенням дисертації.

Структура подання матеріалу в авторефераті відповідає встановленим вимогам. Основні положення роботи викладені в авторефераті логічно і послідовно. Зміст автореферату об'єктивно відображає основний зміст, основні положення та результати дисертаційної роботи, розбіжностей між суттю автореферату та дисертації не виявлено.

8. Загальні зауваження до дисертаційної роботи

1. Перший розділ було б доречно зробити меншим за об'ємом поданої інформації та тексту.

2. При виборі моделі турбулентності течії рідини доцільно було б здійснити порівняння результатів, що отримані із застосуванням різних моделей турбулентності.
3. На рисунку 3.6 представлені результати розрахунку механічних втрат на тертя рідини в щілині електродвигуна, проте не зрозуміло чому вибрано діаметр ротора 132 мм, якщо в описаному вище електродвигуні він становить 95 мм.
4. В роботі пропонується визначати профіль складових абсолютної швидкості з використанням математичних залежностей, проте не вказано ступінь кореляції результатів розрахунку та результатів числового моделювання. В роботі пропонується визначати профіль складових абсолютної швидкості за допомогою математичних залежностей і вказано, що вони «мають задовільну збіжність з результатами отриманими шляхом числового моделювання течії». Доцільно було б вказати в її числове значення.
5. Доцільно було б представити баланс втрат енергії в герметичному моноблочному насосі в графічному вигляді та порівняти різні конструкції.
6. В роботі представлені результати дослідження тільки для насосів в діапазоні зміни коефіцієнта швидкохідності 61...66, що є недостатнім щоб поширити отримані результати на інші насоси.
7. В дисертаційній роботі і авторефераті присутні орфографічні помилки неточності в застосуванні термінів, які не впливають на суть роботи в цілому.

Однак, вказані зауваження стосуються окремих деталей дослідження і жодним чином не зменшують наукової та практичної цінності результатів дослідження і не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи Молошного О.М.

9. Загальний висновок


Проведений аналіз змісту дисертації Молошного О.М. «Вплив конструкції підвідного пристрою герметичного моноблочного насоса з порожнистим валом на його робочий процес та характеристики», автореферату і публікацій дозволяє зробити такі висновки:

- 1) Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, сутність якої полягає в удосконаленні конструкції герметичного моноблочного насоса з порожнистим валом на основі результатів наукових досліджень впливу особливостей конструкції підвідного пристрою на течію та енергетичні процеси в проточній частині насоса і елементах електродвигуна.


- 2) Тема дисертаційного дослідження є актуальною.
- 3) Результати, представлені автором у дисертаційній роботі, мають наукову новизну і практичну цінність і достатні для рівня кваліфікації кандидат технічних наук.
- 4) Отримані результати пройшли апробацію на науково-технічних конференціях, а також впроваджені в промисловості.
- 5) Дисертацію виконано у відповідності з вимогами, які пред'являються до оформлення дисертаційних робіт. За змістом дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати.
- 6) Текст автореферату відповідає тексту дисертаційної роботи та оформлений відповідно до чинних вимог.
- 7) Виконання фізичного експерименту на базі Вроцлавського університету науки і техніки (Польща) свідчить про високу інтеграцію автора в міжнародну наукову співдружність.
- 8) Висловлені зауваження не знижують наукової цінності основних досягнень дисертанта.

В цілому дисертаційна робота Молошного О.М. на тему «Вплив конструкції підвідного пристрою герметичного моноблочного насоса з порожнистим валом на його робочий процес та характеристики» є завершеним науковим дослідженням, що відповідає вимогам п.п. 11, 13, 14 “Порядку присудження наукових ступенів...” Міністерства освіти і науки України. Автор дисертаційної роботи Молошний Олександр Миколайович заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати.

Офіційний опонент,
кандидат технічних наук, с.н.с
завідувач кафедри гідрогазових систем
Національний авіаційний університет


В.М. Бадах




свідоцтво
Вчений секретар
Національного авіаційного університету

